

Heikki Luomala

Ratapenkereiden monitorointi

Heikki Luomala

Ratapenkereiden monitorointi

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2010

Liikennevirasto

Helsinki 2010

Kannen kuvat: Kauko Sahi ja Heikki Luomala

ISSN-L 1798-6656
ISSN 1798-6656
ISBN 978-952-255-550-2

Verkkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656
ISSN 1798-6664
ISBN 978-952-255-543-4

Juvenesprint Oy
Tampere 2010

Julkaisua myy/saatavana

Juvenesprint Oy, Tampereen Yliopistopaino Oy, Naulakatu 2, 33100 Tampere
Puhelin 020 756 8695

Liikennevirasto
PL 33
00521 HELSINKI
Puhelin 020 637 373

Heikki Luomala: Ratapenkereiden monitorointi. Liikennevirasto, rautatieosasto. Helsinki 2010. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 22/2010. 85 sivua ja 2 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6656, ISBN 978-952-255-550-2, ISSN 1798-6664 (pdf), ISBN 978-952-255-543-4 (pdf).

Avainsanat: ratapenger, monitorointi, stabiliteetti, routa, painumaletku

Tiivistelmä

Ratapenkereiden monitorointi -projektissa tutkittiin ja kehitettiin erilaisia mittaus- ja monitorointijärjestelmiä ratarakenteiden kenttämittauksiin. Tutkimus kohdentui kolmeen osaluokkaan: stabiliteettiltaan heikkojen ratapenkereiden siirtymien seurantamittaukset, roudan syvyyden ja routanousun mittaus sekä ratapölkyn kohtaamien rasitusten mittaus. Näiden lisäksi kehitettiin jälkiasennettava mittausmenetelmä ratapenkereen kerroksittaisten muodonmuutosten mittaamiseen. Tutkimukseen kuului myös rata-alan eri toimijoihin kohdennettu haastattelu mittaustarpeiden löytämiseksi ja mittausmenetelmien kehittämiseksi niihin.

Stabiliteettiltaan heikkojen ratapenkereiden liikennöinti edellyttää penkereen liikkeiden monitorointia, kun varmuusluku sortumaa vastaan on 1,3...1,5. Ratapenkereen liikkeiden automaattiseen mittaamiseen on tarjolla vain yksi varteenotettava kaupallinen mittausmenetelmä eli automaatti-inklinometri. Inklinometrillä toteutettu mittaus on pistemäinen ja mittausjärjestely on kattavasti useina pisteinä toteutettuna hintava. Tutkimuksessa selvitettiin muiden, lähinnä hajautettujen mittausmenetelmien soveltuvuutta penkereen liikkeiden mittaamiseen. Hajauteutulla mittausmenetelmällä tarkoitetaan mittauksia, jossa yhdellä mittalaitteella voidaan mitata lukuisia pisteitä laajalta alueelta. Rantaradalla Paimiossa tehtiin kenttämittauksia tutkimuksessa kehitetyllä painumaletkulla sekä valokuidulla kulkuaikamittauksena. Kenttäkokeiden avulla selvitettiin mittauslaitteistojen toimivuutta maastossa ja laitteistojen pitkäaikaiskestävyyttä. Kokeet palvelivat siten ennen kaikkea mittalaittekehitystä.

Useissa laboratoriokokeissa on havaittu ratarakenteiden sisältävän routivia materiaaleja. Rataverkolla esiintyy myös huomattava määrä routivia kohteita. Kuitenkaan kaikki routivia materiaaleja sisältävät penkereet eivät roudi. Laboratoriokokeiden ja radassa tapahtuvan routimisen välisen yhteyden varmistamiseksi oli syntynyt tarve kehittää kenttäkelpoinen mittausjärjestely, minkä avulla roudan syvyys ja routanousu voidaan määrittää maastossa todellisessa ympäristössä. Kehitetyllä akkutoimisella mittausjärjestelyllä tehtiin havaintoja talven 2008–2009 ajan kuudessa kohteessa: Viialassa, Karkussa, Mäntsälässä, Limingassa ja Torniossa (kaksi kohdetta). Roudan syvyyden mittaus perustui ratapenkereen lämpötilan mittaukseen. Routanousu mitattiin siirtymäantureilla, joiden referenssipisteiksi asennettiin havaintotangot routimattomaan syvyyteen. Mittaustulokset lähetettiin kohteista toimistolle GPRS-yhteyttä käyttäen.

Betoniratapölkyn rasituksia koskeissa tarkasteluissa oli syntynyt tarve kehittää yksinkertainen jälkiasennettava mittausmenetelmä, jonka avulla ratapölkyn kohtaamat rasitukset voidaan mitata erilaisilla tukikerroksilla ja alustoilla kenttämittauksina. Kehitetyn mittauslaitteiston toimivuutta testattiin Pääradalla Viialassa sijainneessa koekohteessa. Ratapölkyn rasituksia mitattiin venymäanturien avulla ja penkereen ominaisuuksia mitattiin kerroksittaisen muodonmuutosanturin avulla. Kohteessa olivat myös routanousun mittaamiseen tarkoitetut havaintotangot ja siirtymäanturit, joiden avulla mitattiin ratapölkyn taivutusta kovan pohjan suhteen.

Paimion ja Viialan koekohteiden ylläpitoa varten kehitettiin etähallintajärjestely. Koekohteiden tietokoneet kytkettiin verkkoon liikkuvan laajakaistan eli Mokkulan avulla. Mittaustietokoneita pystytettiin siten hallinnoimaan verkon yli toimistolta. Myös mittausdataa siirrettiin verkon kautta toimistolle käsiteltäväksi.

Heikki Luomala: Övervakning av banvallar med monitorer. Trafikverket, Järnvägsavdelningen. Helsingfors 2010. Trafikverkets undersökningar och utredningar 22/2010. 85 sidor och 2 bilagor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6656, ISBN 978-952-255-550-2, ISSN 1798-6664 (pdf), ISBN 978-952-255-543-4 (pdf).

Nyckelord: banvall, monitorering, stabilitet, tjäle, sättnings slang

Sammandrag

I projektet Övervakning av banvallar med monitorer undersökte och utvecklade man olika mät- och monitoreringssystem för fältmätningar av banvallar. Undersökningen inriktades på tre delområden: uppföljningsmätningar av förskjutningar i banvallar med svag stabilitet, mätning av tjäldjup och hur tjälen går ur jorden samt mätningar av de belastningar som syllarna utsätts för. Dessutom utvecklades ett system som mäter skiktvisa deformationer i banvallen och som kan installeras i efterhand. I undersökningen ingick också en intervju som gjordes för att utreda vilka mätbehov som förekommer och mätmetoder för dem. Intervjun riktades till olika aktörer inom banbranschen.

Trafik på banvallar med svag stabilitet förutsätter monitorering av rörelserna i banvallen när säkerhetstalet för ras är 1,3...1,5. Det finns bara ett beaktansvärt kommersiellt alternativ när det gäller automatisk mätning av rörelser i banvallen och det är en automatisk inklinometer. Mätning med inklinometer sker punktvis och när det görs på ett omfattande sätt med mätningar på många punkter är det dyrt. I undersökningen utreddes hur andra, främst distribuerade mätmetoder, lämpar sig för mätning av rörelser i banvallen. Med distribuerade mätmetoder avses mätning där man med en apparat kan göra mätningar på många punkter över ett stort område. På kustbanan i Pemar gjordes fältmätningar med hjälp av en sättnings slang som utvecklades under undersökningen samt genom transporttidmätning med optisk fiber. Med hjälp av fältmätningarna utreddes hur mätapparaturen fungerade i terrängen samt apparaturens hållbarhet över tid. Experimenten tjänade därmed främst utvecklandet av mätapparatur.

I ett flertal laboratorieexperiment har man kunnat konstatera att banvallskonstruktionerna innehåller material som tar skada av tjälen. På bannätet förekommer ett betydande antal tjälfarliga ställen. Ändå drabbas inte alla banvallar som innehåller tjälfarliga material av tjäle. För att kunna fastställa sambandet mellan laboratorieprov och tjälbildning på banvallarna fanns det ett behov av att utveckla ett fältdugligt system, med vars hjälp det är möjligt att bestämma tjäldjup och tjällossning i terrängen i verklig omgivning. Med det batteridrivna mätsystem som utvecklats gjordes observationer vintern 2008-2009 på sex ställen, i Viiala, Karkku, Mäntsälä, Limingo och Torneå (två ställen). Mätningen av tjäldjupet byggde på mätning av temperaturen i banvallen. Tjällossningen mättes med förskjutningsgivare som fick referenspunkter i form av observationsstänger som placerades på tjälfritt djup. Mätresultaten skickades från mätställena till forskningslaboratoriet med hjälp av GPRS-överföring.

Vid granskningarna av den belastning som betongsyllarna utsätts för hade det uppstått ett behov av att utveckla ett enkelt mätsystem som kan installeras i efterhand, med vars hjälp man kan göra fältmätningar av de belastningar som syllarna utsätts för när de har olika stödlager och underlag. Den apparatur som utvecklades testades på stambanan vid mätstället i Viiala. Syllbelastningen mättes med töjningsgivare och banvallens egenskaper mättes med en givare för skiktvis deformation. På mätstället fanns också observationsstängerna som var avsedda för att mäta tjällossningen och de förskjutningsgivare med vars hjälp man mätte syllens böjning i förhållande till en hård botten.

För underhållet av observationsställena i Pemar och Viiala utvecklades ett system för fjärrunderhåll. Datorerna på mätställena kopplades till nätet med hjälp av mobilt bredband och usb-modem och kunde därför administreras över nätet från forskningslaboratoriet. Också mätdata överfördes via nätet till laboratoriet för behandling.

Heikki Luomala: Monitoring of Track Embankments. Finnish Transport Agency, Railway Department. Helsinki 2010. Research reports of the Finnish Transport Agency 22/2010. 85 pages and 2 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6656, ISBN 978-952-255-550-2, ISSN 1798-6664 (pdf), ISBN 978-952-255-543-4 (pdf).

Keywords: embankment, monitoring, stability, frost, settlement pipe

Abstract

The Monitoring of Track Embankments project was established to study and to develop new measurement and monitoring methods for railway structures. The study focused on displacement measurements of low stability embankments, frost penetration and frost heave measurements of railway structures, and measurement of stresses on railway sleepers. In addition, a new modification of Multi Depth Deflectometer was developed. It is mountable on existing railway embankments in very short amounts of time. An interview of railway engineering staff was made to locate new measurement needs, some of which were filled.

Operating on low stability railway embankments requires displacement monitoring when the safety factor against shear failure is between 1.3-1.5. Only one commercial measuring method is on the market that fills the measurement requirement. The measurement device is called an automatic inclinometer and only measures displacements in one location. In a wide scale, several devices are needed and the system becomes expensive. Different distributed measurement systems, which are able to measure several measuring points, were studied. A test site was created on the Helsinki-Turku line in Paimio, and an automatic distributed settlement gauge was developed and installed. An automatic optic fibre strain measurement device based on time of flight was also installed. The aim of the field studies was to find out the reliability and long term stability of the distributed measuring devices.

Several materials in structural layers of railway track have been found to be frost-susceptible in laboratory tests and frost heaves occur in many locations on the railway network. Still all embankments build with frost-susceptible materials do not necessarily create frost heaves. Verifying of laboratory tests was needed. An automatic measuring system was developed for frost penetration and frost heave measurements. The developed system was battery based and the data was sent to the server via GPRS-connection. During the winter of 2008-2009 six systems were located in Viiala, Karkku, Mäntsälä, Liminka and Tornio (two setups). Frost penetration measurement was based on temperature measurement. A three meter long anchor was installed through the structure and the frost heave of the sleeper was measured by using linear variable transducers.

The service life of concrete sleepers on different ballasts and subgrades is not well known. It has been noticed that the understanding of the sleepers' stresses would require field measurements. A system for strain measurements of the upper surface of the sleeper was developed and the functionality and reliability of the system was tested in Viiala on the main track. The stresses of the sleeper were measured by a Strain Gauge and the deformation of the embankment was measured by a Multi Depth Deflectometer. Frost penetration and frost heave measurements were also made. The same installation was used for measuring the dynamic deflection of a sleeper.

A remote connection was established for management of Paimio and Viiala test sites. The measurement computers were connected to Internet via wireless broad band connection. The computers were managed and the data was transferred through the network.

Esipuhe

Tämä ratapenkereiden monitorointia käsittelevä tutkimushanke tehtiin Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustekniikan laitoksen Maa- ja pohjarakenteiden yksikössä Ratahallintokeskuksen (nykyisin Liikennevirasto) toimeksiannosta. Tutkimuksen toteutti ja tämän raportin laati diplomi-insinööri Heikki Luomala.

Työtä ohjasivat tekniikan tohtori Antti Nurmikolu ja professori Pauli Kolisoja TTY:ltä. Tilaajan edustajana työtä ohjasi Liikenneviraston Rautatieosaston teknisen yksikön päällikkö Matti Levomäki. Työssä ovat avustaneet useat eri henkilöt TTY:ltä, Liikennevirastosta, VR-Rata Oy:stä ja Pöyrystä. Heistä nimeltä mainittakoon yli-insinööri Kauko Sahi ja laboratoriomestari Marko Happo TTY:ltä.

Työ jatkuu monitorointia käsittelevien aiheiden parissa Elinkaaritehokas rata-tutkimusohjelman puitteissa.

Helsingissä elokuussa 2010

Liikennevirasto
Rautatieosasto

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO.....	8
2	STABILITEETILTAAN HEIKKOJEN RATAPENKEREIDEN MONITOROINTI.....	9
2.1	Mittaustarpeiden kuvaus	9
2.2	Saatavissa olevia kaupallisia sovelluksia.....	10
2.2.1	Suorat siirtymämittaukset	10
2.2.2	Epäsuorat mittausten menetelmät.....	13
2.3	Tuotekehityksen mahdollisuuksia	15
2.4	Laboratoriokokeet.....	18
2.4.1	Kaapelitutkamittaus.....	18
2.4.2	Sulaketyyppinen ratkaisu valokuidun avulla	20
2.4.3	Venymämittaus valokuidun avulla.....	21
2.4.4	Painumaletku.....	27
2.5	Paimion koekohde.....	31
2.5.1	Koekohteen esittely.....	31
2.5.2	Instrumentoinnit.....	31
2.5.3	Mittaustulokset	35
2.5.4	Mittauslaitteistojen toimivuus ja mittaustulosten luotettavuus.....	40
3	ROUDAN MONITOROINTI	43
3.1	Mittaustarpeen kuvaus.....	43
3.2	Saatavissa olevia kaupallisia sovelluksia.....	43
3.3	Kehitetty mittaussjärjestely.....	45
3.4	Routaseurantakohteet.....	48
3.5	Mittauslaitteistojen toimivuus ja mittaustulosten luotettavuus.....	52
3.6	Routahavainnot	54
4	RADAN RAKENTEEEN MONITOROINTI	59
4.1	Mittaustarpeen kuvaus.....	59
4.2	Mittauslaitteiden rakentaminen ja kehitys.....	59
4.2.1	Betoniratapölkyn yläpinnan venymän mittaus	59
4.2.2	Venymäliuskahvistin	60
4.2.3	Akselipainon mittaus	62
4.2.4	Penkereen kerroksittaiset muodonmuutokset	63
4.3	Viialan koekohde	66
4.3.1	Koekohteen esittely.....	66
4.3.2	Instrumentoinnit.....	66
4.3.3	Tiedon keruu, tallennus ja siirto	71
4.3.4	Lyhyt katsaus mittaustuloksiin	73
4.4	Mittausmenetelmien käytettävyys ja hyötykustannukset	78
4.5	Haastattelut.....	79
5	PÄÄTELMÄT JA JATKOTUTKIMUSTARPEET	81
5.1	Stabiliteetiltaan heikkojen ratapenkereiden valvonta	81
5.2	Roudan monitorointi	82
5.3	Radan rakenteen monitorointi.....	82
5.4	Jatkotutkimustarpeet	83

LIITTEET

Liite 1 Painumaletkun pitkäaikaissuranta Paimiossa

Liite 2 Pulssitetun TOF-valokuitututkan käyttö ratapenkan liikkeen mittauksessa

1 Johdanto

Pääosa Suomen rataverkosta on rakennettu aikana, jolloin konetyövoimaa on ollut käytössä rajoitetusti. Osin konekapasiteetin vähyyden takia radat on rakennettu mahdollisimman tasaiselle maalle. Etenkin rannikolla tasamaat ovat paksuja pehmeikköjä. Ratapenkereet on alun perin suunniteltu kohtaamaan vain melko pieniä akselipainoja ja penkereiden koko on ollut aluksi vaatimaton. Akselipainojen kasvaessa penkereen kokoa on myös kasvatettu. Joillakin pehmeiköillä on ajauduttu tilanteeseen, missä laskennallinen varmuus radan sortumista vastaan on hyvin pieni. Ongelmakohteita poistetaan kunnossapidon avulla, mutta kaikkia kohteita ei pystytä korjaamaan taloudellisten seikkojen takia kerralla. Tästä syystä ohjeissa on annettu mahdollisuus sallia pienempi varmuusluku, kunhan ratapenkereitä valvotaan seurantamittauksin (RATO 3). Ohjeissa ei ole kuitenkaan kerrottu mitä seurantamittauksilla tarkoitetaan, miten ja millä menetelmällä niitä tulisi tehdä.

Seurantamittauksia on tehty radan perusparannusprojektien yhteydessä automaattisilla inklinometreillä. Ne ovat usein toimineet odotusten mukaisesti, mutta joitakin ongelmia on havaittu. Ongelmat ovat liittyneet mittalaitteen asennustekniikkaan ja ne lienevät ratkaistavissa. Inklinometri mittaa maanpinnalta katsoen vain yhden pisteen vaakasuuntaisia liikkeitä. Niiden rinnalle on syntynyt tarve kehittää hajautettuja mittausmenetelmiä, joiden avulla voidaan seurata laajemman alueen liikkeitä.

Radan tasaisuuden kannalta ratarakenteen routimattomuus on ensiarvoisen tärkeää. Ratarakenteet on pyritty mitoittamaan siten, että rakenne koostuu routimattomista materiaaleista ja rakenteen paksuus on riittävä estämään pakkasen pääsyn pohjamaahan. Eri aikakausina routimattomuuden kriteerit ovat vaihdelleet silmämääräisistä arvioista laboratoriokokeisiin. Ratarakenteet saattavat siten sisältää routivia materiaaleja. Ratarakenteista otetuista näytteistä tehdyissä routanousukokeissa on havaittu useiden materiaalien olevan maalajiominaisuuksiltaan routivia. Kuitenkaan kyseiset materiaalit eivät välttämättä aiheuta ongelmia penkereessä, sillä routiminen edellyttää routivan materiaalin lisäksi routimiselle suotuisia olosuhteita eli pakkasta ja helposti saatavilla olevaa vettä. Etenkin veden saatavuus vaikuttaa merkittävästi penkereiden routimisherkkyyteen. Toimivan kuivatuksen avulla veden saantia voidaan merkittävästi rajoittaa. Routivuuteen liittyvien laboratoriokokeiden verifiointiseksi on syntynyt tarve kehittää yksinkertainen menetelmä, jonka avulla routan syvyys ja routanousu voidaan määrittää kentällä automaattisesti.

Ratojen perusparannuksen yhteydessä puiset kreosootilla kyllästetyt ratapölkkyt vaihdetaan usein betonisiksi. Betoniratapölkkyjen käyttöiästä soratukikerroksilla ei ole olemassa kattavia kokemuksia. Asian selvittämiseksi on tehty joitakin laboratoriomitataavan kokeita. Näiden kokeiden perusteella on nähty tarpeelliseksi tehdä mittauksia myös kentällä. Pääradoilla betoniratapölkkyjä on käytetty selvästi pidempään. Perusparannuksen yhteydessä myös betonisia ratapölkkyjä saatetaan joissain tapauksissa uusia, vaikka niiden käyttöikä ei ole vielä saavutettu. Betonipölkyn kohtamien rasiusten ja käyttöikä tarkastelujen tekemiseksi on syntynyt tarve kehittää yksinkertainen helposti liikuteltava mittausjärjestely, jonka avulla ratapölkyn kohtaamat rasitukset voidaan mitata erilaisilla tukikerroksilla ja ratapenkereillä.

2 Stabiliateetiltaan heikkojen ratapenkereiden monitorointi

2.1 Mittaustarpeiden kuvaus

Osa maamme rataverkosta sijaitsee pehmeikköalueilla, missä ratapenkereiden stabi-
liteetti on heikko. Näiden rataosien turvallisen liikennöinnin takaamiseksi on syntynyt
tarve kehittää seurantamittausmenetelmiä. Seurantamittauksilla tarkoitetaan rata-
penkerein pitkäaikaista seurantaa. Perinteisesti seurantamittauksia on tehty käsin.
Nykypäivänä on mahdollista käyttää erilaisia antureita ja rakentaa automaattinen
monitorointijärjestelmä penkerein liikkeen valvontaan. Stabiliateetiltaan heikoilla
ratapenkereillä voidaan liikennöidä ilman seurantamittauksia siihen saakka, kunnes
rataosaa parannetaan. Rataosan suurinta sallittua nopeutta tai akselipainoa nostet-
taessa astuvat voimaan RATO 3 mukaiset varmuuskertoimet stabi-
liteetin suhteen. Vaatimuksia heikompi varmuus stabi-
liteetin suhteen voidaan sallia myös jatkossa, jos
heikon stabi-
liteetin omaavien penkerein liikkeitä valvotaan seurantamittauksilla.

Seurantamittauksilla eli ratapenkerein liikkeen seurannalla tarkoitetaan penkerein
sijainnin seurantaa. Mittauksiin käytettävää menetelmää ei ole sen tarkemmin määri-
tely. Seurantaa voidaan tehdä käsin tehtävillä mittauksilla, mutta sitä ei voida toteut-
taa jatkuvasti. Turvallinen liikennöinti edellyttää reaaliaikaisia tai lähes reaaliaikaisia
seurantamittauksia. Mittausten reaaliaikaisuus ei edellytä välttämättä täysin ajan-
tasaista mittausta, sillä oletettavasti penkerein sortuma kehittyy hitaasti useiden
tuntien, vuorokausien tai jopa viikkojen ajan. Esimerkiksi kerran tunnissa tai jopa
kerran päivässä tehtäviä mittauksia voitaneen siten pitää reaaliaikaisina. Tyypillisesti
seurantamittauksia tarvitsevat kohteet sijaitsevat paksuilla pehmeiköillä, joiden
maaperä on silttiä, savea, liejua tai turvetta. Tällaiset kohteet ovat yleensä hyvin laa-
joja. Seurantamittauksia tarvitsevat rataosat voivat olla pituudeltaan jopa satoja met-
rejä pitkiä. Ratapenkerein pitkänomaisen muodon takia penger sortuessaan oletetta-
vasti liikkuu melko pitkältä matkalta. Alle 10 metriä pitkä sortuma ei liene mahdolli-
nen suoralla ratalinjalla, jossa ei ole rumpuja, siltoja tai muita penkerein epäjatku-
vuuskohtia. Noin kymmenen metrin pistevälillä saavutettaneen riittävä paikka-
resoluutio.

Seurantamittausten mittaustarkkuusvaatimus on hankalasti määriteltävä asia. Ha-
vainnoitavan liikkeen minimivaatimus lienee haarukoitavissa kahden reunaehdon
perusteella. Yhtäältä mittaustarkkuusvaatimuksia asettavat turvallisen liikennöinnin
vaatimukset eli ratageometrian asettamat vaatimukset. Toisaalta mittaustarkkuus-
vaatimukset voitaisiin esittää maarakenteiden rakenteellisen kestävyys-
kannalta. Nämä kaksi reunaehto eivät ole kuitenkaan vaativuudeltaan samanlaisia. Penkerein
voitaisiin esimerkiksi antaa painua turvallisesti paljon enemmän, kuin mitä liiken-
nöinnin vaatimukset sallivat. Näiden reunaehto-
jen perusteella määriteltiin tutkimuk-
sen alussa tavoitemittaustarkkuus, jonka kaikkien vakavasti harkittavien mitta-
usme-
netelmien tulee täyttää. Mittaustarkkuusvaatimus asetettiin 10 millimetriin, olipa
mitattava suure minkä tahansa koordinaatin suunnassa. Mittaustarkkuusvaatimus ei
kuitenkaan edellytä, että seurantaa tehdään kolmiulotteisesti.

Tämän tutkimusosion tavoitteena oli löytää tai kehittää reaaliaikainen seuranta-
mittausjärjestelmä, jonka avulla tieto uhkaamassa tai alkamassa olevasta sortumasta

saadaan ennakkoon. Kaikki saatavilla olevat teknologiat olivat tutkimuksen alkaessa tarkastelussa mukana. Hyvin pian selvityksen edetessä kuitenkin havaittiin, että valmiita sovelluksia tämän kaltaiseen pitkäaikaiseen monitorointiin on hyvin vähän saatavilla. Tästä huolimatta tavoitteista ei tingitty vaan päätettiin jatkaa tutkimusta ja suunnata tutkimusta kaupallisten ratkaisujen ohella myös omaa tuotekehitystä kohti.

2.2 Saatavissa olevia kaupallisia sovelluksia

2.2.1 Suorat siirtymämittaukset

Inklinometrit

Maaperän liikkeiden valvontaan on käytetty Suomessa ja maailmalla perinteisesti inklinometrejä. Inklinometri on tarkka kulma-anturi, joka kertoo mittalaitteen asennon suhteessa maan vetovoimaan. Mittaukset tehdään maahan asennetusta inklinometriputkesta. Putki voidaan painaa maahan tai asentaa tarkoitusta varten tehtyyn porareikään. Putki asennetaan kovaan pohjaan saakka. Tämä on välttämätöntä, sillä mittaukset tehdään nimenomaan putken alaosan suhteen. Perinteisesti mittaukset on tehty käsin. Mittauksessa inklinometri lasketaan putkeen ja mittaustulokset luetaan tietyiltä syvyyksiltä. Mittauksia toistamalla saadaan tietoa putken ja siten maaperän liikkeistä eri syvyyksillä. Käsin tehtävät mittaukset ovat varsin luotettavia, mutta työläitä. Käsin tehtävät mittaukset eivät täytä reaaliaikaisen seurannan kriteeriä. Mittauksia tekevät useat konsulttitoimistot.

Merkittävä kehitysaskel inklinometrihistoriassa on ollut inklinometriä automatisointi. On olemassa sovelluksia, joissa perinteinen inklinometri on automatisoitu rakentamalla mekaniikka mittalaitteen liikuttamiseksi putkessa. Tämä oli kuitenkin vain välivaihe, sillä selvästi yksinkertaisempi tapa on käyttää useita antureita samanaikaisesti. Suomalainen FinMeas Oy on kehittänyt digitaalisiin kaltevuusantureihin perustuvan mittalaitteen, joka mahdollistaa reaaliaikaiset mittaukset (kuva 2.1).



Kuva 2.1 Automaattinen inklinometri asennettuna radan varteen (Ryhänen et al, 2007)

Mittalaitteen merkittäviin etuihin kuuluu mittaustavan ominaisuus paljastaa kaikkien maakerrosten liikkeitä vaakasuunnassa. Myös maakerrosten painuman määrittäminen on teoriassa mahdollista, mutta käytännössä epätarkkaa, koska painuvien maakerrosten aiheuttama anturien kulman muutos on hyvin pieni. Mittausmenetelmän heikkoudeksi voidaan lukea tarve asentaa inklinometriputki aina kovaan pohjaan saakka. Jos pehmeikkö on hyvin paksu, tulee mittauspisteestä paitsi kallis, myös mittalaitteen mittaustarkkuus kärsii. Maan pinnalla tapahtuvien liikkeiden mittaustarkkuus heikkenee pehmeikön paksuuden kasvaessa, koska mittaustulos lasketaan useiden antureiden ilmoittaman kulmamutoksen perusteella.

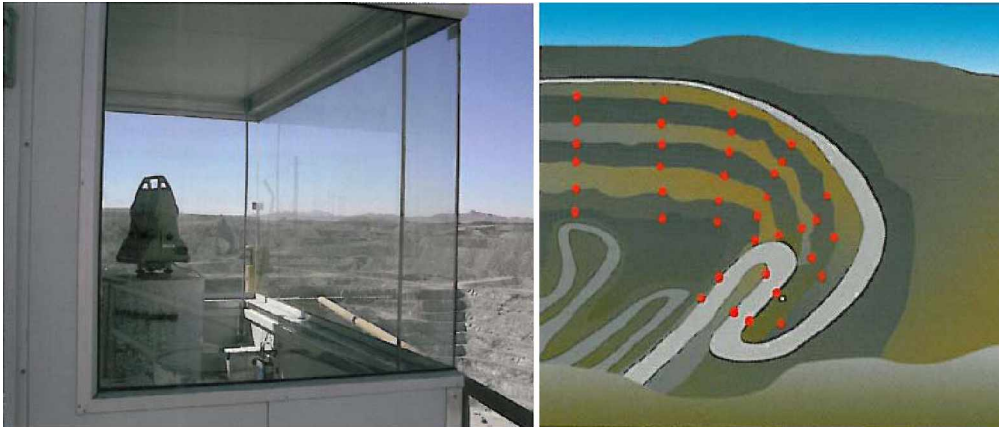
Automaattisten inklinometrien käytössä on ollut asennuksesta aiheutuvia ongelmia. Porareikään asennetut inklinometrit ovat liikkuneet porareikään suhteen ja siten mitatut liikkeet eivät ole olleet kaikilta osin todellisia. Asennukseen liittyvä ongelma lienee ratkaistavissa eikä se siten voi olla este mittalaitteiden käytölle.

Automaattinen inklinometri on yksinkertainen ja hyvä ratkaisu kohteisiin, joissa tiedetään tarkalleen seurantamittauksia tarvitseva kohta. Yhden tai kahden havaintopisteen rakentaminen automaattisella inklinometrillä on tällä hetkellä edullisin tapa reaaliaikaisten seurantamittausten toteuttamiseksi. FinMeasin lisäksi automaattisia inklinometrejä toimittaa ainakin kaksi tahoa ulkomailla. FinMeasin automaattinen inklinometri tarvitsee toimiakseen hyvin vähän sähköä. Mittalaite toimii akun avulla noin vuoden kerrallaan. FinMeas toimittaa tuotteiden lisäksi myös verkkopalvelua, josta mittaustuloksia voi seurata. Palvelussa voidaan asettaa myös automaattisia hälytysrajoja mahdollisten liikkeiden varalta.

Takymetrit

Penkereen siirtymämittaukset voidaan tehdä erittäin luotettavasti takymetrilla. Takymetreja ja mittaajia on kohtalaisen paljon saatavilla. Pinnalta tehtävä mittaus kertoo liikkeet kolmen koordinaatin suunnassa. Käsillä tehtävät takymetrimittaukset ovat monessa tapauksessa halvin ja paras ratkaisu. Mittaus ei ole kuitenkaan reaaliaikainen. Riittävän usein tehtävät seurantamittaukset ovat jo lyhyehkön ajan kuluessa hintavia.

Markkinoilla on myös robottitakymetreja, joilla mittaus voidaan tehdä automaattisesti ja reaaliaikaisesti. Muun muassa Leica ja Geotrim markkinoivat tällaisia tuotteita ja mittausjärjestelmään tarvittavia ohjelmistoja. Mittauksissa robottitakymetri asennetaan kiinteästi liikkumattomaan paikkaan, josta on esteetön näkyvyys mittauspisteisiin (kuva 2.2). Mittauspisteisiin asennetaan prismat, joiden sijainnin mittalaite mittaa halutuun väliajoin. Mittausohjelmisto osaa antaa hälytyksen, jos jokin mittauspisteistä liikkuu. Mittausjärjestely on varsin kallis ja lähinnä tästä syystä se ei ole yleistynyt kovin laajasti. Suomessa ei ole tietävästi tehty tämän tyyppisiä mittauksia, mutta ulkomailla joitakin seurantakohteita on olemassa. Vaikka mittausten menetelmä antaa tarkimman mahdollisen mittaustuloksen hyvissä oloissa, on mittaustavalla omat puutteensa. Esimerkiksi lumi ja jää hankaloittavat prismojen näkyvyyttä ja prismat saattavat huurtua. Myös ilkivalta saattaa vaurioittaa maan pinnalla olevia havaintopisteitä. Robottitakymetri vaatii säännöllistä huoltoa, joten mittalaitteita pitäisi olla käytössä kaksi. Toinen laite olisi koko ajan mittaamassa, kun toista laitetta huolletaan.



Kuva 2.2 Avolouhoksen seinien liikkeiden valvontaa robottitalyometrilla Etelä-Afrikassa (Zeiner 2007)

Robottitakyetrin testikäyttöä harkittiin vakavasti, koska laitteella saavutetaan markkinoiden paras mittaustarkkuus. Menetelmällä voidaan mitata jopa alle 1 mm liikkeitä. Mittausjärjestelyn laitekustannukset ovat vähintään 50 k€. Menetelmästä luovuttiin lähinnä korkean hinnan ja joihinkin sääoloihin yms. oletettavasti liittyvien teknisten ongelmien takia.

GPS-mittaus

RTK-GPS –laitteet (Real Time Kinematic Global Positioning System) mahdollistavat nykyisin mittaukset senttimetrin tarkkuudella. Saavutettava tarkkuus saattaa olla riittävä ratapenkereen siirtymien mittaamiseen. Ainakin vaakatasossa tapahtuvat liikkeet pystytään havaitsemaan ennen kuin liikkeet kasvavat liikennöinnin kannalta liian suuriksi. Manuaaliset mittaukset voidaan tehdä huomattavasti nopeammin kuin takyetrilla, sillä mittauksiin tarvitaan vain yksi henkilö. Käsillä tehtynä mittaukset eivät ole kuitenkaan reaaliaikaisia.

GPS-laitteita voidaan myös automatisoida. Suomessa tällaisia automaattisesti valvottavia kohteita ei ole tietävästi olemassa, mutta ulkomailta löytyy muutamia esimerkkejä. Muun muassa Iranissa valvotaan massiivisen voimalaitospadon liikkeitä automaattisilla GPS-laitteistoilla (kuva 2.3). Laitteistot ovat toistaiseksi niin harvinaisia, että edes laitteistojen myyntiedustajat eivät osaa hinnoitella mittauksia. Laajemmassa mittakaavassa yhden mittauspisteen hinnaksi tullee muutamia tuhansia euroja.

GPS-mittaus toimii sääoloista riippumatta kaikkina vuodenaikoina. Edes lumipyry ei periaatteessa estä GPS -mittausten tekemistä, vaikka se ainakin suuresti vaikeuttaa takyetrimitauksia. Suurin rajoitus GPS-mittauksen käytössä on mittalaitteiden sijoittaminen maastoon ja laitteiden vaatiman sähkön syötön järjestäminen. Mittauspisteisiin sijoitettavat vastaanottimet tarvitsevat sähköä. Sähkösyötön järjestäminen ei ole vaikeaa, mutta se lisää mittausjärjestelyn kustannuksia. Suurempi haaste lienee GPS-vastaanottimen sijoittaminen maastoon siten, että se pysyy paikallaan penkereen suhteen. Vastaanottimien antenni on melko suuri, halkaisijaltaan noin 20 cm. Antenni saattaa herättää kiinnostusta ja lisätä houkutusta ilkivaltaan.



Kuva 2.3 Karkhehin voimalaitospato Iranissa, jota valvotaan automaattisilla GPS-laitteilla (Zeiner 2007)

2.2.2 Epäsuorat mittausmenetelmät

Valokuitumittaus

Viime vuosina Suomen markkinoille on tullut muutamia toimijoita, jotka myyvät valokuitumittaussovelluksia. Valokuitumittaukset perustuvat useisiin erilaisiin valon käyttäytymisilmiöihin, mutta penkereen liikkeen havainnointiin perustuvissa mittauksissa on pohjimmiltaan kyse venymämittauksesta. Ratapenkereen liikkeitä voidaan ainakin teoriassa mitata venymän avulla. Mittauksessa anturikaapeli asennetaan radan pituussuuntaan. Oletuksena on, penkereen liike aiheuttaa venymää mittauskaapeliin. Mittaus on suhteellinen eikä kerro liikkeen suuruutta tai suuntaa.

Uraa uurtavia tahoja mittausmenetelmien kehittämisessä Suomessa ovat olleet Oulun yliopiston Elektroniikan laboratorio ja Fortum Power and Heat. Oulussa valokuitujen parissa on tehty tutkimusta jo parikymmentä vuotta. Fortum on soveltanut tekniikkaa voimalaitospatojen liikkeiden seurannassa. Näiden lisäksi Reiniko Oy toimii Sveitsiläisen Smartecin agenttina markkinoiden heidän tuotteitansa. Reinikon tuotteet ovat selvästi pisimmällä kaupallisessa mielessä. Reinikon kokemus maarakenteisiin liittyvistä mittauksista on kuitenkin muita toimijoita vähäisempää.

Venymän mittaukseen valokuidun avulla on olemassa kaksi käyttökelpoista tapaa: valon kulkuaikaan perustuva venymämittaus ja Brillounin takaisinsirontaan perustuva venymämittaus. Molemmat mittaustavat ovat hajautettuja mittauksia, joissa yhdestä anturikaapelin päästä voidaan tehdä useita havaintoja kaapelin matkalta. Näiden lisäksi on olemassa useita erilaisia pistemäisiä venymäantureita, mutta niiden käyttäminen kyseisessä sovelluksessa on selvästi hankalampaa.

Valon kulkuaikaan perustuvassa mittauksessa kaapeliin asennetaan määrävälein heijastimia, joista valo heijastuu takaisin. Nimensä mukaisesti menetelmässä mitataan valon matkaan kuluvaa aikaa. Anturikaapeliin lähetetään valopulssi, josta osa

jatkaa heijastimen ohi ja osa palaa takaisin. Koska valo kulkee hyvin suurella nopeudella (3×10^8 m/s), täytyy havainnointinopeuden olla erittäin suuri. Oulun yliopisto on kehittänyt mittalaitteen, jossa on riittävä tarkkuus noin yhden millimetrin venymän havaitsemiseksi 20 metriä pitkässä kaapelissa. Mittaustarkkuus on sinällään varsin hyvä ja paljon lupauksia herättävä. Anturikaapelin lämpötila vaikuttaa kuitenkin merkittävästi valon kulkuaikaan. Lämpötila voidaan mitata ja tehdä lämpötilakorjaus referenssikaapelin avulla. Referenssikaapeli tulee asentaa anturikaapelin kanssa samaan lämpötilaan siten, että mahdolliset penkereen liikkeet eivät aiheuta kaapeliin venymää. Tietyissä rajoissa referenssi on mahdollista järjestää myös ratapenkereessä.

Toinen varteenotettava valokuitumittausmenetelmä on Brillouin sirontaan perustuva venymämittaus. Siinä anturikaapeli ei tarvitse heijastimia, vaan venymän tulkinta tehdään suoraan normaalista valokaapelista. Brillouin tutka on suomalaisittain harvinaisuus, sillä sellaista ei ole tiettävästi maassamme. Fortum on tehnyt kyseisellä laitteella mittauksia omissa sovelluksissaan, mutta heidän mittalaitteensa on ollut vuokrattuna. Reiniko Oy:n kautta hankittuna Brillouin tutka maksaa noin 200 k€, joten sellaista ei pieneen mittaustarpeeseen pystytäkään hankkimaan. Mittaustarkkuuden kannalta Brillouin sirontaan ja valon kulkuaikaan perustuvat menetelmät vastaavat toisiaan. Molemmissa menetelmissä on vastaava lämpötilariippuvuus.

Valokuituun perustuvissa mittausmenetelmissä on käytännön sovelluksia ajatellen puutteita. Niillä ei voida mitata ratapenkereen liikkeitä suoraan, vaan mittaustulos on aina suhteellinen. Kun ratapenger liikkuu yhdestä kohdasta, alkaa penkereeseen pituussuunnassa asennettuun kaapeliin kohdistua venymää. Kaapelin venymä ei ole kuitenkaan suoraan muutettavissa siirtymäksi (millimetreiksi), koska liikkuvan penkereen osan pituutta ei tiedetä. Myöskään liikkeen suuntaa ei tiedetä. Nämä seikat eivät kuitenkaan täysin estä menetelmän soveltamista, jos mittaus muuten toimii luotettavasti. Toinen haaste liittyy käytettävään anturikaapeliin. Valoa johtava valokuitu on lasia ja halkaisijaltaan vain millimetrin murto-osia. Sitä ei voida asentaa maarakenteeseen sellaisenaan, vaan kuitu on suojattava erilaisilla vaipoilla ja vedonpoistoilla. Kuidun kaapelointi vähentää kuituun kohdistuvia rasituksia, mutta myös samalla heikentää kuidun kykyä toimia anturina. Kaapelin kuori voi teoriassa venyä ilman että venymä välittyy itse anturina toimivaan kuituun. Toisaalta kaapelointi estää tehokkaasti kuitua venymästä, koska kaapelissa on vedonpoistot. Nämäkin puutteet ovat ratkaistavissa olevia asioita, mutta ne on syytä tiedostaa.

Kaapelitutkamittaus

Del Marissa Californiassa Yhdysvalloissa on instrumentoitu rantatörmällä sijaitseva ratapenger käyttäen koaksiaalikaapelia ja kaapelitutkaa (TDR, Time Domain Reflectometer) (Kane et al 2004). Rannan ja penkereen väliin pituussuunnassa asennettu lähes 1000 metriä pitkä kaapeli on sijoitettu kaapeliojaan noin puolen metrin syvyydelle. Anturikaapeli on valettu betonivaippaan, jonka mitat olivat noin 200 x 300 mm. Mittausmenetelmä perustuu oletukseen, että penkereen liikkeet rikkovat betonipötkön aiheuttaen koaksiaalikaapeliin muodonmuutoksen, joka on havaittavissa kaapelitutkalla. Kaapelitutka lähettää jännitepulssein kaapeliin, joka heijastuu kaapelin päästä takaisin. Jos kaapelissa on huomattava muodonmuutos, pulssi heijastuu ”vikaantuneesta” kohdasta takaisin joko kokonaan tai osittain (vaimenee). Menetelmällä voidaan siis havaita mahdollisen liikkeen paikka, mutta ei suuruutta. Kalibroimalla voitaneen saada myös suuntaa antavaa tietoa liikkeen suuruudesta, mutta liikesuunta täytyy päätellä muilla keinoin.

Menetelmä kuulostaa yksinkertaisuudessaan varsin houkuttelevalta vaihtoehdolta, sillä mittauksessa ei tarvita monimutkaisia laitteita ja käytettävät komponentit ovat varsin huokeita. Epäilyksen aiheita tuottavat kuitenkin sellaiset asiat kuten betonin kutistuminen ja suomalaisissa ratapenkereissä tyypillisesti esiintyvä routa. Molemmat mekanismit saattavat vaurioittaa betonivaippaa ja aiheuttaa penkereen liikkeitä muistuttavia vaurioita anturikaapeliin ilman penkereen haitallisia liikkeitä.

Muita markkinoilla olevia antureita ja mittausmenetelmiä

Useissa kohteissa maailmalla maaperän lujuudessa tapahtuvia muutoksia on arvioitu huokosvedenpaineen perusteella. Huokospaineantureita voidaan kustannussyistä asentaa vain tarkasti valittuihin kohteisiin. Antureita tulisi sijoittaa useille eri syvyyksille ja useisiin poikkileikkauksiin, jotta saavutetaan edes välttävä paikkaresoluutio. Käytännössä antureiden lukumäärä kasvaa niin suureksi, että menetelmän käyttö ei ole mahdollista laajassa mittakaavassa. Luontevimmat käyttökohteet liittyvät rumpujen tukkeutumisen takia tapahtuvien padotusten mittaukseen. Kaupallisesti saatavat sähköiset anturit maksavat noin 1 000 €/kpl.

Invarteräslanka-anturit on suunniteltu juuri maan liikkeiden mittaamiseen. Menetelmässä mittalaitte kiinnitetään liikkumattomaan maaston kohtaan. Mittalaitteesta lähtee invarteräksinen lanka, joka kiinnitetään liikkuvaan kohteeseen. Lanka on mittalaitteessa kelalla. Laitte mittaa kelan pyörimisliikettä. Laitte toimii siis eräänlaisena venymäanturina. Menetelmän idea perustuu invarteräkseen, jonka lämpölaajeneminen on hyvin vähäistä. Siten on mahdollista mitata tarkasti kohteen liikkeitä ilman että langan lämpölaajeneminen vaikuttaa tulokseen merkittävästi. Menetelmä soveltuu kuitenkin käytettäväksi vain pistemäisesti. Yhden anturin hinta on noin 2 000 € sisältäen muutaman kymmenen metriä invarteräslankaa.

Useissa kohteissa maailmalla arvioidaan maavyörymien todennäköisyyttä sadannan perusteella. Yleensä vuoristoalueilla sijaitsevista kohteista mitataan sademäärää. Kokemuseräisesti on arvioitu hälytysrajat, miten suuri ja missä ajassa satanut vesimäärä saattaa aiheuttaa maanvyöryn. Näissä kohteissa mitataan myös pohjaveden pintaa yhtenä parametrina. Mittaustarve muistuttaa etäisesti ratapenkereen liikkeiden mittausingelmaa, mutta sen käytettävyys ei liene meidän suomalaisilla tasamaila kovinkaan hyvä.

Geofoneja on käytetty useissa kohteissa maanvyörymien hälyttimenä. Geofoni on tärinäanturi, joka mittaa heilahdusnopeutta. Geofonin ei tarvitse olla välttämättä kiinni liikkuvassa maamassassa, sillä herkkä anturi havaitsee tärinän etäältä. Rataympäristössä esiintyy liikennetärinää yleisesti. Sortuman ja liikenteen aiheuttamat tärinät on olettavasti vaikeata erottaa toisistaan. Tästä syystä menetelmä ei liene käyttökelpoinen rataympäristössä. Menetelmä soveltuu parhaiten maanvyörymäkohteisiin, joissa ei ole liikennetärinää.

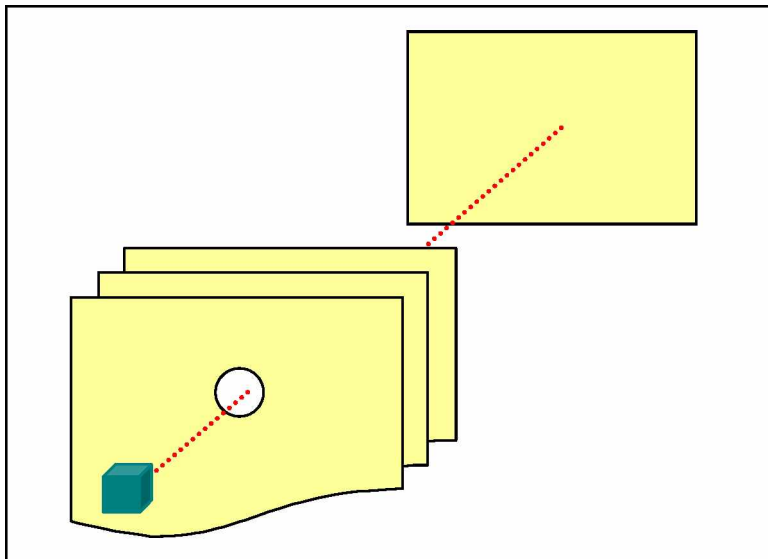
2.3 Tuotekehityksen mahdollisuuksia

Samalla kun kartoitettiin kaupallisia sovelluksia, mietittiin miten penkereen liikkeitä voitaisiin mitata jollakin aivan uudella tavalla. Tutkimuksen edetessä mieleen nousi lukuisia ideoita. Monet ideoista hylättiin jo pian ilmenneiden teknisten puutteiden takia. Jotkut ideat säilyivät aivoriihessä pidempään, osa pääsi laboratoriotesteihin saakka (ks. kohta 2.4). Tavoitteena oli jalostaa mahdollisimman yksinkertainen, mutta

toimiva mittausjärjestely. Ohessa on kuvattuna lyhyesti muutamia kehityskelpoisia ideoita.

Lasersovellukset

Laserilla mitataan etäisyyksiä esimerkiksi rakennusmittauksissa. Laserilla voitaisiin mitata helposti penkereen ja kiintopisteen välistä etäisyyttä kohtisuoraan rataa vasten. Yhden pisteen mittaaminen olisi yksinkertaista, mutta useiden pisteiden mittaus koituisi hankalaksi. Yksi kehitysidea olikin asentaa lasersäde osoittamaan raiteen pituussuuntaan levyjen läpi, joissa olisi halkaisijaltaan pieni reikä (kuva 2.4). Näin voitaisiin yhdellä mittalaitteella valvoa jopa yli 100 metriä pitkää rataosaa. Mittauksen paikkaresoluutio voitaisiin vapaasti valita reikälevyjen määrän avulla. Mittaus olisi luonteeltaan varoittava, sillä jonkin reikälevyn liikkuesssa lasertähtäyksen mittaama matka muuttuu. Mittaus ei kerro liikkeen suuruutta, mutta ilmoittaa laserista lukien ensimmäisen liikkuvan levyn paikan. Reikälevyjen reiän koolla voitaisiin vaikuttaa menetelmän herkkyyteen. Käytännössä mittaus tulisi toteuttaa kaapelikourussa, jotta välttyttäisiin lumen aiheuttamilta näkemäesteiltä.



Kuva 2.4 Periaatekuva kaapelikourussa tapahtuvasta lasertähtäyksestä ja liikkeen valvonnasta.

Tarkemman pohdinnan jälkeen havaittiin, että mittaus toimii hyvin vain geometrialtaan suoralla rataosalla. Kaarre ja pituustaitte radassa rajaavat yhden laserin valvoman alueen melko lyhyeksi. Laskennallisesti tarkastellen, sisämitoiltaan 100 mm kokoisessa kaapelikourussa, lasersäde kulkisi kaarresäteeltään 2000 metrin kaarteessa 40 metriä ja kaarresäteeltään 10000 metrin kaarteessa 90 metriä. Läheskään kaikilla rataosilla ei edes ole kaapelikourua. Lisäksi kaapelikourut eivät noudattele täysin raiteen geometriaa, mikä todennäköisesti vähentäisi yhden laserin käyttömatkaa entisestään.

Sulaketyyppinen varoitin

Kaapelikourun hyödyntäminen valvontamittauksissa vaikutti houkuttelevalta, koska se mahdollistaa kaapeloinnin lisäksi tukevan kiinnityspisteen erilaisille mittalaitteille. Yksi esiin noussut vaihtoehto oli itse kaapelikourun toimiminen anturina. Kouruelementtien välille voitaisiin asentaa anturit, jotka ilmoittaisivat kahden peräkkäisen kouruelementin välisestä kulmanmuutoksesta. Yksinkertaisimmillaan anturi olisi sulake, joka rikkoutuisi riittävän suuren liikkeen vaikutuksesta. Menetelmä ei kertoisi liikkeen suuruudesta, mutta ilmoittaisi liikkeen paikan.

Sulaketyyppistä menetelmää pohdittiin monelta kantilta. Yhdellä menetelmällä tehtiin jopa laboratoriokokeita. Kokeissa sulakkeena käytettiin valokuitua, joka valettiin laastiprisman sisään. Ajatuksena oli, että jo pienen liikkeen vaikutuksesta hyvin hauras valokuitu katkeaa. Paljaalla kuidulla tehdyissä kokeissa näin olikin, mutta kuidun asentaminen sellaisenaan maastoon on mahdotonta. Kun kuitu suojattiin asennuskelpoiseksi kaapeliksi, kuidun rikkomiseen tarvittava liike kasvoi liian suureksi.

Kiihtyvyyssanturit

Kiihtyvyyssantureiden tai paremminkin kaltevuusantureiden käytön mahdollisuuksia pohdittiin pitkään. Ajatuksena oli sijoittaa kaltevuusantureita esimerkiksi kaapelikouruun tietyin välein. Toinen vaihtoehto olisi asentaa anturit penkereeseen johonkin muuhun jäykkään esineeseen kuten metalliputkeen tai vastaavaan. Kiihtyvyyssantureiden mittaustarkkuutta on tutkittu laajasti muun muassa FinMeasin automaattinklinometrin tuotekehityksen yhteydessä (Luomala 2006). Tuolloin tehdyissä kokeissa päädyttiin oletamaan, että kaltevuusantureiden kulmanmuutoksen mittaustarkkuus on lämpötilariippuvuus huomioituna noin 1 mm / metrille. Koska mahdollinen sortuma on todennäköisesti melko pitkänomainen, kaltevuusantureiden mittaustarkkuus ei ole välttämättä tässä sovelluksessa riittävä. Ongelmana lähelle maan pintaa asennettavissa antureissa on voimakas ympäristön lämpötilavaihtelu, mitä ei esiinny merkitsevässä määrin syvälle maahan asennettavissa inklinometrisovelluksissa. Menetelmää ei lähdetty testaamaan, koska mittaustarkkuuden ei oletettu olevan riittävä nykyisin käytössä olevilla järkevän hintaisilla antureilla.

Painumaletku

Painumaletkuja on käytetty painumien mittaamiseen vuosikymmenten ajan. Painumaletkun mittaustapa on varsin yksinkertainen. Menetelmässä mitataan nesteellä täytetyn putken painetaso suhteessa tunnettuun kiintopisteeseen. Paine kasvaa lineaarisesti syvyyden suhteen. Sovelluksissa on käytetty yleensä yhtä paineanturia, joka on asennettu kiinteästi yhteen mittauspisteeseen tai liikutettavaa anturia, jota on kuljetettu putken läpi ja tehty mittaukset määrävälein. Ilmanpaine vaikuttaa absoluuttiseen paineeseen merkittävästi. Painumaletkusovelluksissa käytetään tavallisesti paineanturia, johon on järjestetty ilmanpaine. Mittaus tehdään suhteessa ilmanpaineeseen eikä se siten vaikuta mittaustulokseen. Juuri ilmanpaineen järjestäminen anturille on kallista, koska se vaatii mittaускаapeliin putken, jota pitkin ilmanpaine pääsee anturille. Samasta syystä kaapelin pituus on rajoitettu. Painumaletkumittaus mahdollistaa kuitenkin millimetriluokan mittaustarkkuuden.

Painumaletkuideaa jalostettiin eteenpäin ja etsittiin käyttökelpoisia edullisia antureita, joita voitaisiin käyttää lukuisia yhtä aikaa. Siten voitaisiin rakentaa radan pituussuunnassa toimiva pitkä painumaletku kohtalaisella paikkaresoluutiolla. Todennäköisesti stabiileetiltaan heikko ratapenger painuu ensin pitkään ennen lopullista sortumistaan. Painumanopeuden kiihtyessä voitaisiin tehdä tarkempia mittauksia muilla menetelmillä. Painumaletku toimisi siten ennalta varoittavana seurantamittauksena. Ilmanpaineen suhteen mittaavia paineantureita on hankalaa käyttää painumaletkussa. Lisäksi ne ovat melko kalliita. VTI Technologies valmistaa absoluuttispaineantureita, joita käytetään esimerkiksi rannetietokoneissa juoksulenkin korkeusprofiilin määrittämiseen. Näiden paineantureiden mittausrésoluutio on 80 mm ilmapatsasta. Vesi on noin 830 kertaa ilmaa raskaampaa, joten vedessä antureiden teoreettinen korkeusaseman mittausrésoluutio on noin 0,1 mm. Anturit ovat digitaalisia eli niitä voidaan elektroniikan avulla liittää yhteen kaapeliin periaatteessa rajattomasti. Näiden antureiden käytön haittana on muuttuva ilmanpaine. Ilmanpaine voidaan kuitenkin vähen-

tää mittaustuloksista, sillä se vaikuttaa samaan putkeen sijoitettuihin antureihin kaikkiin yhtä paljon.

Tätä ideaa jalostettiin mietintämyssyissä pitkään, sillä menetelmän edut olivat huomattavat. Aluksi yritettiin keksiä ratkaisu, miten elektroniikan komponenttina myytävä paineanturi voitaisiin suojata siten, että se menestyisi vedessä tai paremminkin pakkasta kestävässä alkoholipohjaisessa liuoksessa. Muutamien prototyyppien jälkeen todettiin, että yksinkertaista ja edullista ratkaisua ei ole olemassa eikä helposti tehtävissä. Menetelmän käytettävyyden kannalta aivan ratkaiseva oivallus oli käyttää paineen välittävänä nesteenä öljyä. Öljyn avulla koko suojausongelma poistui, sillä sähkölaitteet toimivat öljyssä oletettavasti vuosikausia. Mittausmenetelmän selkeisiin etuihin kuuluu mahdollisuus vaihtaa käytettävät anturit painumaletkun sisälle tarpeen vaatiessa myös jälkikäteen.

Kun mittausmenetelmän mekaaninen toiminta oli ratkaistu, siirryttiin kehittämään elektroniikkaa mittausta varten. Tässä kohtaa turvauduttiin alihankkija Probyte Oy:n apuun. Probyte suunnitteli, teetti ja kokosi piirit, joita voidaan sijoittaa samaan mittaustaapeliin ja lukea sarjaliikenteen avulla. Jopa sata anturia voidaan kytkeä sarjaan neljään signaalikaapeliin. Myöskään varsinaista mittalaitetta eli loggeria ei tarvita, sillä antureilta tuleva signaali on valmiiksi digitaalinen. Mittaukseen kelpaa käytännössä mikä tahansa tietokone. Tarvittaessa voidaan toimia ilman tietokonettakin, mutta sitten tiedonkeräystä varten tarvitaan erillinen lukulaite. Prototyyppivaiheessa hankittiin vain mittaamiseen soveltuva ohjelmisto. Varsinainen mittaustulosten käsittely tehtiin käsin.

2.4 Laboratoriokokeet

Parhaaksi katsottujen ideoiden toimivuutta arvioitiin pienen mittakaavan laboratoriokeiden avulla. Laboratoriokokeita tehtiin kaapelitutkamittauksella, sulaketyyppisellä ratkaisulla, valokuidulla ja painumaletkulla.

2.4.1 Kaapelitutkamittaus

Amerikkalaisten kollegoiden innoittamana ensimmäiseksi testattiin kaapelitutkamittaukseen perustuvaa seurantamittausmenetelmää. Aluksi käytiin lukuisia sähköpostikeskusteluja menetelmän toimivuudesta Steve Farringtonin kanssa, joka on ollut mukana toteuttamassa Del Marin rantatörmällä sijaitsevalla rataosalla tehtyjä mittauksia. Hänen mukaansa TDR mittaus toimii hienosti. Useista kyselyistä huolimatta ei kuitenkaan saatu varmuutta siitä, oliko kyseisillä mittauksilla havaittu penkereen liikkeitä. Keskusteluissa ilmeni, että kaapelitutkan herkkyyks ei ole riittävä havaitsemaan pieniä muodonmuutoksia. Näin ollen oli turvauduttu kehittämään signaalinkäsittelyä, jonka avulla kaapelitutkan vastaanottamia heijasteita mahdollisista penkereen liikkeistä pystyttiin tulkitsemaan.

Tuolloin heräsi epäily, että menetelmä ei ole ehkä sittenkään niin toimiva kuin kirjallisuus antaa ymmärtää. Selvyyden saamiseksi ja toimivuuden varmistamiseksi päätettiin rakentaa pienen mittakaavan koejärjestely. Koetta varten hankittiin kahta erilaista koaksiaalikaapelia (antennikaapelia). Kaapelitutka vuokrattiin TTY:n Sähköosastolta. Testausta varten rakennettiin kaksi koekappaletta. Koaksiaalikaapelit sijoitettiin laastista valmistetun prisman sisään. Koekappaleiden mitat olivat 1 x 0,1 x 0,1 metriä (kuva 2.5).



Kuva 2.5 Kaapelitutkamenetelmän laboratoriotesteissä käytetyt koekappaleet rakentamisvaiheessa. Testejä varten rakennettiin kaksi koekappaletta käyttäen erilaisia koaksiaalikaapeleita. Laastin idea oli hauraana materiaalina murtua helposti ja vaurioittaa kaapelia pientenkin penkereen liikkeiden vaikutuksesta.

Koekappaleiden annettiin rauhasa kuivua noin viikon ajan. Tämän jälkeen tehtiin alkumittaus kaapelin kunnon varmistamiseksi. Penkereen liikkeitä mallinnettiin taivuttamalla prismaa keskeltä. Raudoittamattomana hauraana materiaalina prisma katkesi hieman yllättäen ja hyvin nopeasti (kuva 2.6). Aiheutettu liike oli suuruudeltaan noin 30 mm metrin mittakannalla. Suuresta liikkeestä huolimatta kaapeli ei vaurioitunut kokeissa siten, että sitä olisi voitu havaita kaapelitutkalla. Vastaava tulos saatiin molemmista koekappaleista. Koejärjestely oli kenties hieman liian pienimittakaavainen, sillä koaksiaalikaapeli pääsi luistamaan laastin sisällä. Pitkässä asennuksessa luistaminen olisi vähäisempää.



Kuva 2.6 Kaapelitutkamenetelmän koekappaleiden taivutuskoe. Hauras materiaali katkesi nopeasti ja kuormitus aiheutti suuren muodonmuutoksen.

Koska rakennettu koejärjestely ei tuottanut toivottua tulosta, selvitettiin millainen kaapelivaurio lopulta tuottaisi havaittavan muutoksen kaapelin impedanssissa. Kaapelia venytettiin ja puristettiin pihdeillä. Kokeissa havaittiin, että kaapeli täytyy käytännössä lähes katketa ennen kuin kaapelivaurio havaitaan kaapelitutkalla. Kaapelin katkeamiseen vaadittava penkereen liike on jo niin suuri, että radan liikennöitävyys ei sitä salli.

Saattaisi olla mahdollista löytää tai valmistaa sellainen kaapeli ja kaapelitutka, joiden herkkyyks olisi menetelmän käytettävyyden kannalta riittävä. Kokeiden perusteella tehtiin kuitenkin päätelmä, että menetelmällä tehtävä mittausta on liian epätarkka ja epämääräinen asetettuihin vaatimuksiin nähden.

2.4.2 Sulaketyyppinen ratkaisu valokuidun avulla

Venymän mittaaminen valokuidun avulla vaatii varsin monimutkaiset ja hintavat mittauslaitteet. Mittausmenetelmän suhteen aiottiin vähän oikaista ja käyttää valokuitua pelkästään varokkeena varottamassa alkavista penkereen liikkeistä. Valokuitu on materiaalina hyvin haurasta ja helposti rikkoutuvaa. Tätä ominaisuutta yritettiin hyödyntää rakentamalla valokuidusta sulakkeen omainen mittausratkaisu. Perusidea oli hyvin vastaava kuin amerikkalaisten kaapelitutkamenetelmässä. Valokuitu asennetaan laastin tai betonin sisään. Hauras valu rikkoutuu helposti jo pienten liikkeiden vaikutuksesta. Liikkeet rikkovat valun sisällä olevan valokuidun.

Idea testattiin rakentamalla hyvin pienen mittakaavan koekappaleita. Prismojen mitat olivat 300 x 50 x 50 millimetriä. Prismaan sisään asennettiin valuvaiheessa erilaisella suojauksella varustettuja valokuituja. Valokuitu oli normaalia valokuitua, jota käytetään tietoliikennekaapeleissa. Pelkän valokuidun halkaisija oli 200 mikrometriä. Kuitu muistuttaa ulkonäöltään ja ominaisuuksiltaan ongensiimaa. Valokuitu on kuitenkin paljon siimaa hauraampaa, sillä se on valmistettu lasista. Kokeissa käytettiin pelkän kuidun lisäksi polyimidillä suojattua valokuitua, jonka kokonaispaksuus oli noin 1 millimetri. Kolmannessa prismassa oli lämmitettävällä kutistesukalla suojattu valokuitu, jonka kokonaispaksuus oli noin 2 millimetriä.



Kuva 2.7 Valokuidulla varustettujen prismojen taivutuskoe. Kokeessa testattiin, voitaisiinko valokuidusta rakentaa yksinkertainen varoitusjärjestelmä, joka ilmoittaisi alkavista penkereen liikkeistä.

Koekappaleet raudoitettiin ohuilla rautalangoilla, jotka mahdollistivat kappaleiden taivuttamisen siten, että muodonmuutos oli mitattavissa (kuva 2.7). Valokuituun syötettiin valoa toisesta päästä ja valon kulkeutumista kappaleen läpi arvioitiin silmämääräisesti kuidun toisesta päästä. Kuitu arvioitiin katkenneeksi, kun kappaleen läpi kulkevan valon määrä väheni selvästi.

Suojaamaton kuitu katkesi raon leveyden ollessa noin 1 millimetri. Tarvittu laskennallinen taivutus yhden metrin mittakannalla oli noin 9 millimetriä. Käytännön sovelluksissa suojaamaton valokuitu ei tulisi menestymään, koska se on liian haurasta asennettavaksi maastossa. Lisäksi jo pienetkin kutistumat valukappaleessa rikkoisivat kuidun. Muita ongelman aiheuttajia ovat jatkuvaksi tarkoitettun betonivalun lämpölaajeneminen ja penkereen routiminen. Katkenneen kuidun jatkaminen maastossa olisi hyvin hankalaa. Näiden seikkojen perusteella päädyttiin hylkäämään ainakin suojaamattoman valokuidun käyttösovellukset.

Valokuidun suojauksen paksuuntuessa rikkomiseen vaaditut siirtymät odotetusti kasvoivat. Kutistesukalla suojattua valokuitua oli jo huomattavan hankalaa katkaista pelkän taivutuksen avulla. Suojaus mahdollisti valokuidun luistamisen kaapelisuojauksen sisällä eikä valokuitu katkennut enää kovinkaan helposti. Toisaalta valokuitu katkesi edelleen helposti koekappaleeseen kohdistuneen leikkausrasituksen avulla.

Sopivan suojauksen avulla valokuidusta olisi luultavasti mahdollista rakentaa yksinkertainen varoketyyppinen valvontaratkaisu. Menetelmä olisi on-off tyyppinen eikä siten ilmoita muuta kuin vihjeen alkavasta liikkeestä. Menetelmällä ei voida mitata penkereen liikkeen suuruutta. Valokuidulle tarkoitettulla kaapelitutkalla on mahdollista paikantaa katkenneen kuidun paikka, joten penkereen liikekohta pystyttäisiin määrittämään. Tämän menetelmän käytöstä kuitenkin luovuttiin sen epämääräisyyden takia.

2.4.3 Venymämittaus valokuidun avulla

Valokuitumittauksia markkinoivien tahojen lupauksia herättävien kuvausten perusteella katsottiin tarpeelliseksi testata venymämittausta valokuidun avulla laboratorio-oloissa pienimittakaavaisessa, mutta todellista ongelmaa simuloivassa kokeessa. Mittaus hankittiin Oulun yliopistolta, koska heillä oli valmiit mittauslaitteet olemassa. Heillä oli myös aikaisempaa kokemusta mittauksen tekemisestä.

Mittausmenetelmän testausta varten rakennettiin 10 metriä pitkä ja poikkileikkaukseltaan 300 x 300 mm kokoinen puinen laatikko (kuva 2.8). Laatikosta tehtiin rakenteeltaan taivutuksen mahdollistava. Laatikko täytettiin puolilleen radan välikerros materiaalia vastaavalla hiekalla ja tiivistettiin jaloin polkemalla vettä apuna käyttäen. Hiekkapatjan päälle asennettiin valokaapeli, joka oli tyypiltään puolustusvoimien kenttävalokaapelia. Kaapeli peitettiin 150 mm paksulla hiekkakerroksella. Lopuksi täyttö tiivistettiin jaloin runsaasti vedellä kastellen. Koejärjestely vastasi kohtalaisen hyvin tilannetta, jossa kaapeli asennetaan ratapenkereeseen auraamalla ja maakerosten annetaan tiivistyä itsekseen vähintään yhden talven yli. Tarkoituksena oli testata miten hyvin hiekkapatja pystyy välittämään liikkeitä kaapeliin. Toisaalta testissä oletettiin selviävän, voiko menetelmän avulla ylipäätään mitata senttimetrin suuruusluokassa olevia liikkeitä.

Koska venymien välittyminen hiekan avulla valokaapeliin oli hieman epäselvää ennen testejä, rakennettiin samalla myös toinen koejärjestely, jossa valokaapeli asennettiin mitoiltaan 0,1 x 0,1 x 10 metriä olevan laastipalkin sisään. Tässä kokeessa mahdollinen kaapelin luistaminen pyrittiin poistamaan tekemällä koekappaleesta riittävän pitkä. Samaan valuun asennettiin kenttävalokaapelin lisäksi kahta erilaista hieman heikommin suojattua valokaapelia.



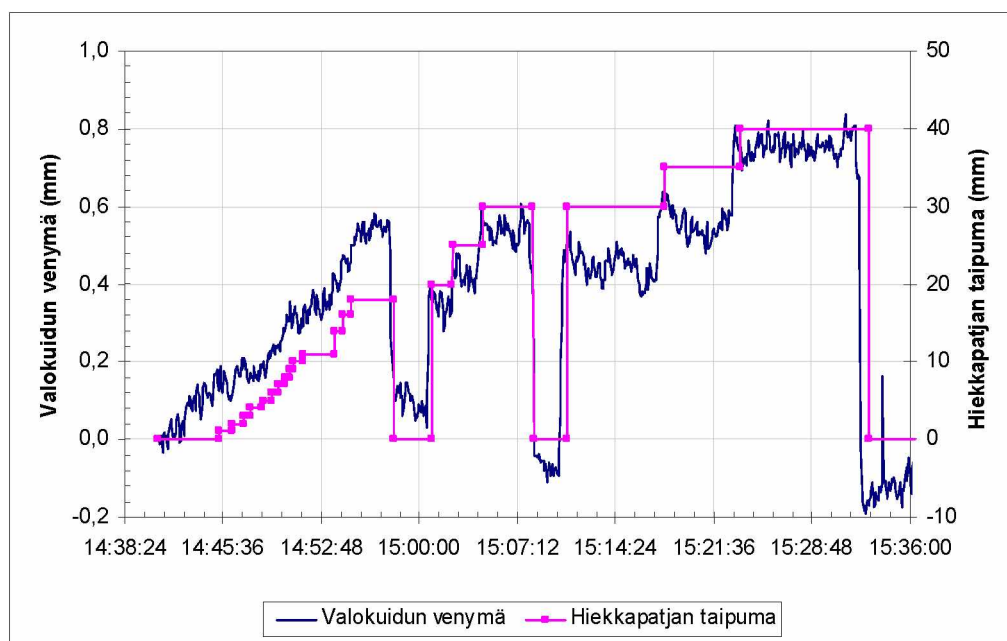
Kuva 2.8 Laboratoriokoejärjestely valokuidun venymämittauksia varten. Menetelmän testausta varten rakennettiin koejärjestely, jossa simuloitiin valokaapelin asennusta penkereeseen joko suoraan hiekkaan tai valukappaleen sisään.

Mittaukset aloitettiin hiekkapatjaan sijoitetulla valokaapelilla. Kaapelin venymää (pituutta) mitattiin lähettämällä kaapeliin miljoonia yksittäisiä valopulsseja, jotka heijastuvat takaisin kaapelin päähän asennetusta heijastimesta. Kaapelin pituuden muutokset määritettiin mittaamalla valopulssien kuluaika. Teoriassa mittauksen tekemiseen riittäisi yksittäinen valopulssi, mutta parempaan mittaustarkkuuteen päästään tekemällä lukuisia mittauksia ja laskemalla niistä keskiarvo. Mittaukset olivat käynnissä jatkuvasti ja hiekkapatjaa taivutettiin tietyin portain. Hiekkapatjaa liikutettiin käsikäyttöisen tunkin avulla ja siirtymää seurattiin mittakellolla (kuva 2.9). Hiekkapatjan päälle asennettiin lanka ennen liikkeiden aiheuttamista. Langan avulla hiekkapatjan liikkeen suuruus pystyttiin määrittämään hiekkapatjan eri kohdissa. Hiekkapatjan päät pysyivät paikoillaan ja liikkeet muodostuivat noin neljän metrin matkalle.



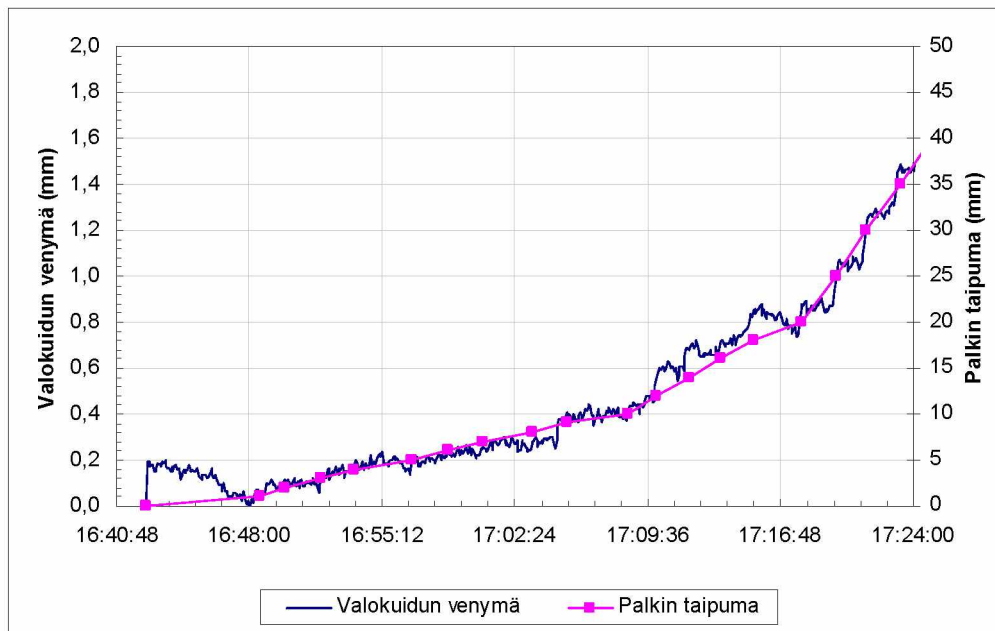
Kuva 2.9 Hiekkapatjan taivutuskoe. Hiekkapatjan sisälle asennettuun kaapeliin syntyy venymää, kun hiekkapatjaa taivutetaan. Kokeella simuloitiin ratapenkereen sortumaa.

Kokeessa havaittiin, että hiekkapatja välittää kohtalaisen hyvin venymän kenttävalokaapeliin. Aiheutetut muodonmuutokset olivat melko suuria, sillä simulaatiossa raataan syntynyt ”kuoppa” oli suurimmillaan 40 mm syvä neljän metrin matkalla. Kuitenkin 20 metriä pitkä valokaapeli venyi mittauksessa vasta vajaan millimetrin. Jo noin 10 mm liike 4 metrin mittakannalla havaittiin selväsi valokuidun venymänä. Mittaustuloksissa oli kohinaa, jonka suuruus oli hiekkapatjan siirtymänä noin 5 mm suuruusluokassa (kuva 2.10).



Kuva 2.10 Valokuidun venymä ja hiekkapatjan taipuma laboratorikokeissa.

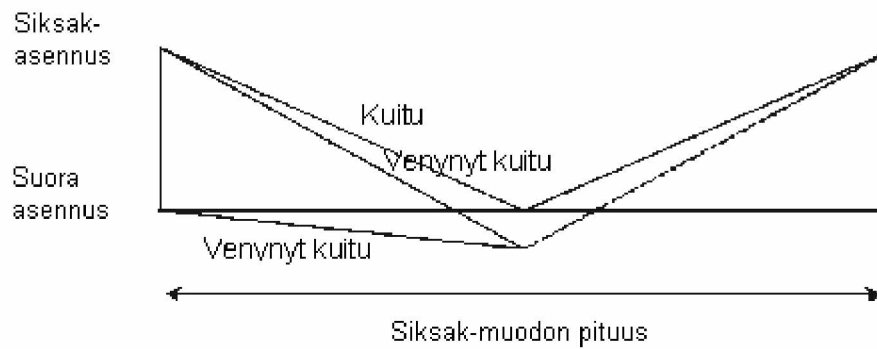
Testausta jatkettiin valokappaleeseen asennetun valokuidun mittauksella. Kuormitus toteutettiin vastaavalla tavalla. Taivutus tuotti noin kaksi kertaa suuremman venymän valokaapeliin kuin hiekkapatjan taivutus (kuva 2.11). Valokuidun venymä vastasi todella hyvin palkin taipuman maksimia. Tässä kokeessa jäi selvittämättä, miten pitkältä matkalta palkki lopulta taipui.



Kuva 2.11 Laastipalkin taivutuskoe. Valokaapeli oli sijoitettu sisälle laastipalkkiin, jota taivutettiin keskeltä.

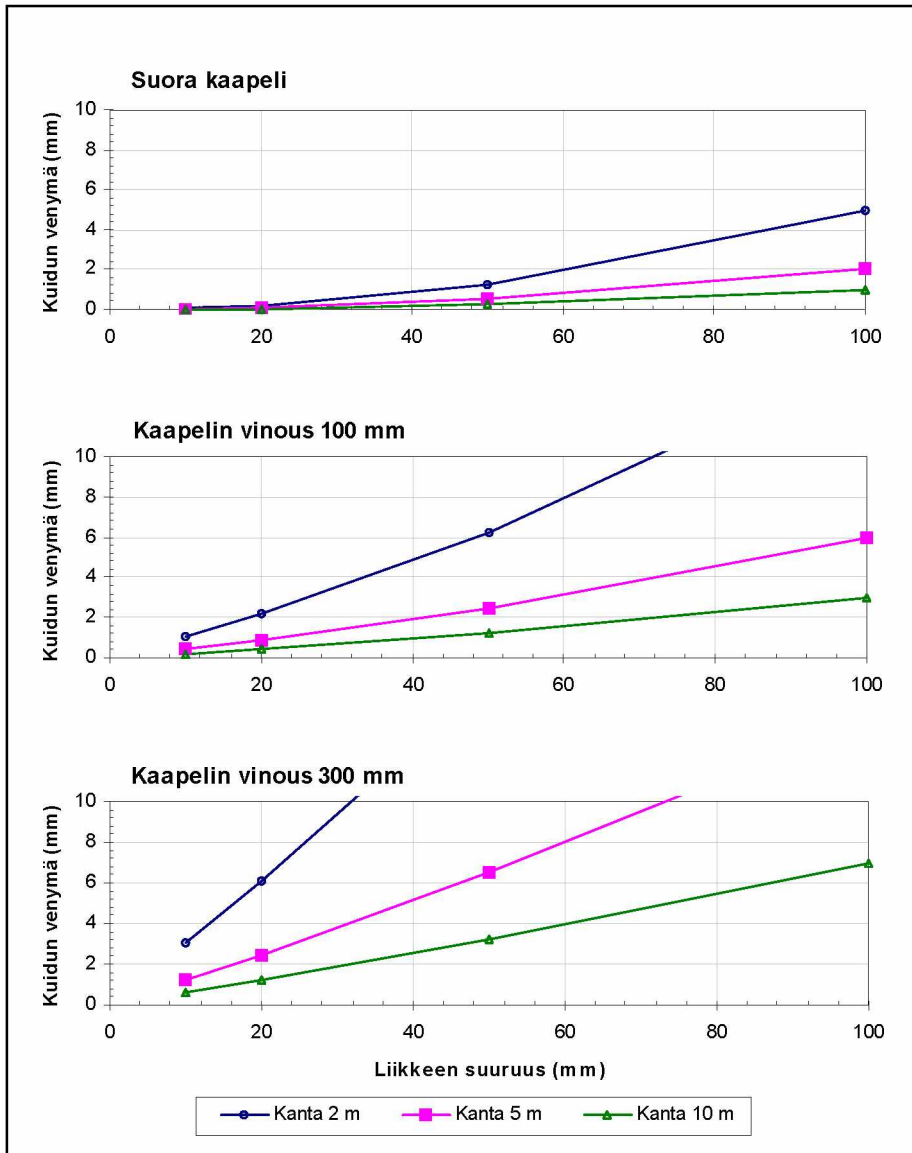
Venymän luotettavaksi mittauksarkkuudeksi oli aikaisempien kenttämittausten ja laboratoriokokeiden perusteella saatu noin 1 mm. Suure ei ole perinteisessä venymän yksikössä (mm/mm tai microstrain), koska anturikaapelin pituus vaikuttaa mittauksarkkuuteen. Venymän suhteellinen mittauksarkkuus paranee anturikaapelin pidetessä, sillä valon kulkuaikaan perustuvan mittauksen tarkkuus perustuu ajan mittauksarkkuuteen. Kaapelin pituudesta riippumatta on aina mahdollista määrittää valon kulkema matka noin 1 mm tarkkuudella. Mittauksarkkuus on siten suhteellisesti katsottuna sitä parempi mitä pidempää anturikaapelia käytetään.

Edellä tehdyissä kokeissa valokuidun venymäksi mitattiin vain alle kahden millimetrin venymiä. Vastaavasti penkereen siirtymät olivat 40 mm. Kun venymän luotettava mittauksarkkuus on 1 mm, voidaan arvioida, että alle 20 mm siirtymää ei ole teoriassaakaan mahdollista mitata kyseisillä menetelmillä, missä kaapeli on asennettu suoraan radan suuntaisesti. Menetelmän herkkyys paranee merkittävästi, kun anturikaapeli asennetaan hieman vinoon oletettua liikesuuntaa kohti. Vinon asennuksen hyötyä voidaan tarkastella suorakulmaisen kolmion avulla. Ajatellaan, että kolmion hypotenuusa on anturikaapeli, kolmion pidempi kanta on ratapenger ja kolmion lyhyempi kanta on penkereen liike. Suorassa asennuksessa lyhyempi kanta on aluksi nolla ja hypotenuusa on siten yhtä pitkä kuin pengker. Penkereen liikkeen alkaessa hypotenuusa pitenee vain vähän. Hypotenuusan pidentyminen nopeutuu sen mukaan miten suuri liike on aiheutettu. Vinossa asennuksessa anturikaapeli asennetaan ikään kuin penkereen liike olisi jo alkanut. Täten vastaava penkereen liike aiheuttaa suuremman hypotenuusan pituudenmuutoksen kuin suorassa asennuksessa (kuva 2.12).



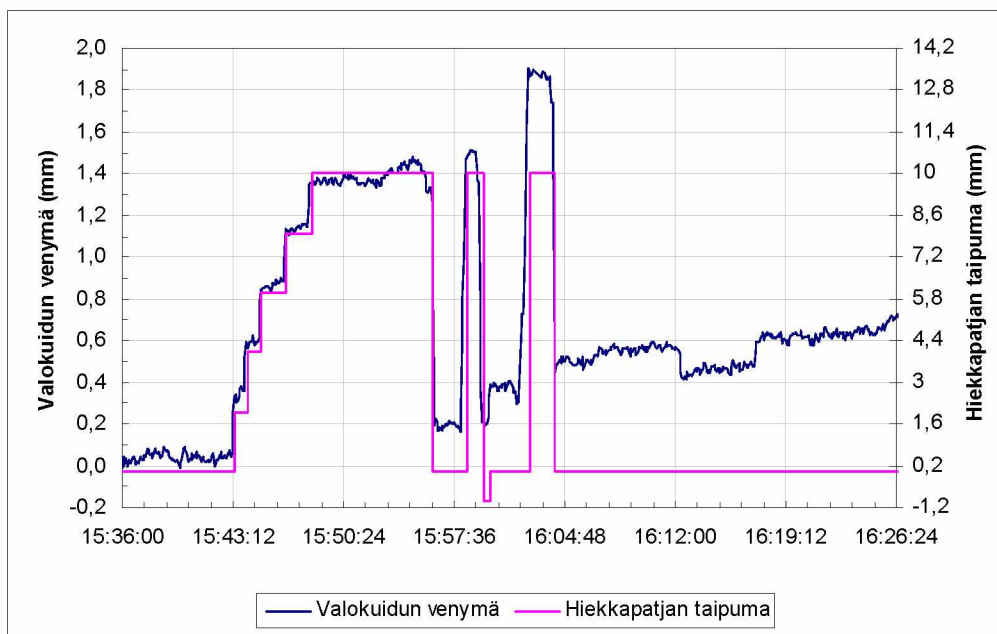
Kuva 2.12 Periaatekuva saksak-muotoon asennetusta valokaapelista.

Jo 100 mm saksak-muoto anturikaapelissa tuottaa etenkin pienillä siirtymillä selkeästi paremman herkkyyden suoraan asennukseen verrattuna. 300 mm saksak-muodon avulla pitäisi pystyä mittaamaan alle 10 mm liikkeitä penkereestä. Jos penkereen painuma syntyy korkeussuunnassa olevan saksak-muodon laen kohtaan, penkereen painuma ei aiheuta venymää vaan anturikaapeli lyhenee. Herkkyys pysyy itseisarvoltaan vakiona, vaikka mikä tahansa saksak-muodon taitepiste liikkuu. Mittausmenetelmällä ei saada selville liikesuuntaa, mutta liikkeen suuruus voidaan tietyissä rajoissa arvioida. Kuvassa 2.13 on esitetty esimerkkilaskelmia kuidun saksak-muodon vaikutuksesta mittaustulokseen.



Kuva 2.13 Valokaapelin asennussuunnan vaikutus kuidun teoreettiseen venymään erilaisilla penkereen liikkeillä. Kuvassa on oletettu, että penkereeseen syntyy muodoltaan kolmiomainen painuma tai siirtymä, jonka pituus on kaksi kertaa kolmion kannan mittainen eli 4, 10 tai 20 metriä. Valokuidun mittausedellytykset paranevat ratkaisevasti, kun anturikaapeli asennetaan vinoon siksak-muotoon.

Siksak-muodon toimivuus testattiin myös käytännössä hiekkalaatikkokokeiden avulla. Anturikaapeli asennettiin vastaavalla tavalla hiekkapatjan sisään kuten ensimmäisessä kokeessa, mutta kaapeli sijoitettiin 300 mm vinouteen viiden metrin kantaa käyttäen. Vinous asennettiin siten, että liikkeet tuottivat kaapeliin mahdollisimman suuren venymän. Kaapeli oli asennettu ikään kuin harjakaton yli, jonka kurkihirttä nostettiin räystäiden pysyessä paikoillaan. Asennuksen avulla mittaukseen saatiin lähes kymmenkertainen herkkyys suoraan asennukseen verrattuna. Jo 10 mm liike aiheutti noin 1,4 mm venymän anturikaapeliin (kuva 2.14).



Kuva 2.14 Hiekkapatjan taivutuskoe, jossa valokaapeli oli asennettu loivaan siksak-muotoon. Siksakin kanta oli 5 metriä ja vinous 300 mm.

Siksak-muodon avulla saatu herkkyyden paraneminen näkyi heti myös selvempänä mittaustuloksen ryömintänä. Kokeen lopuksi mitattiin samaa tilannetta pitkän aikaa. Mittaustuloksissa oli ryömintää, joka aiheutui ympäristön lämpötilamuutoksesta. Kokeen aikana aurinko kääntyi paistamaan ikkunasta sisään säteiden osuessa suoraan hiekkapatjaan. Tehty koe osoitti, että valokuidun avulla tehty venymämittaus saattaa olla varsin käyttökelpoinen mittaussovellus, jos menetelmän lämpötilariippuvuus saadaan hallitusti kompensoitua.

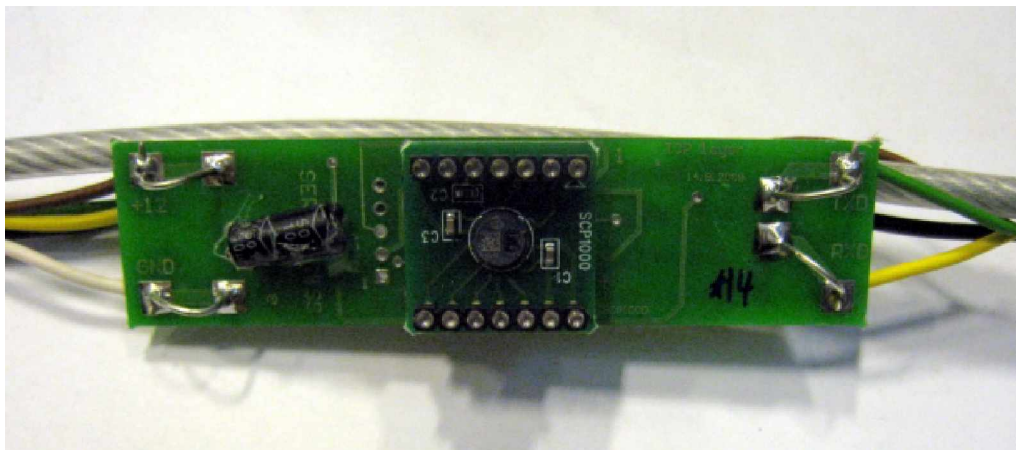
2.4.4 Painumaletku

Painumaletkusovelluksen toimivuuden testaus aloitettiin hankkimalla aluksi muutama digitaalinen paineanturi ja yhden anturin lukemiseen soveltuva mittalaite. Tämä mittalaite oli demoversio, jota anturivalmistaja myy tuotteidensa käyttöä harkitseville laitevalmistajille harjoitus- ja testauslaitteeksi. Laite toimii usb-väylän kautta. Laitteen mukana tulivat myös tarvittavat ajurit ja tiedonkeruuohjelmistot. Toimivan mittalaitteen avulla päästiin heti testaamaan paineantureiden ominaisuuksia. Kuten paineanturin tuotetiedoissa luvattiin, paineanturilla pystyttiin mittaamaan korkeus-asemaa ilmassa noin 100 mm tarkkuudella. Tietenkin jo hyvin pienet painevaihtelut kuten oven avaus ja anturin ohi kulkeminen vaikuttivat mittaustulokseen.

Anturin testaaminen lopullisessa muodossaan vaati useita välivaiheita. Anturi yritettiin ensin suojata siten, että siitä olisi saatu vesitiivis. Parin prototyypin jälkeen todettiin, että helppoa ratkaisua ei ollut olemassa. Koko menetelmästä oltiin siinä vaiheessa jo luopumassa. Ratkaisu oli lopulta varsin yksinkertainen. Anturi päätettiin upottaa öljyyn. Heti havaittiin, että anturin korkeusaseman mittaustarkkuus on öljyssä erittäin hyvä, jopa parempi kuin 1 mm. Toisaalta heti myös havaittiin, että ilmanpaineen muutokset vaikuttavat mittaustulokseen todella paljon. Suurimmillaan ilmanpaine voi vaihdella yhden metrin korkuisen öljypatsaan aiheuttaman paineen verran. Yhden anturin avulla ei voitu tehdä ilmanpainekorjausta riittävän tarkasti, jotta olisi voitu nähdä anturin todellinen mittaustarkkuus aiotussa sovelluksessa. Alustavat havain-

not olivat kuitenkin niin rohkaisevia, että päätettiin rakentaa prototyyppi, jonka avulla voidaan lukea useita antureita samanaikaisesti.

Laboratoriokokeita varten rakennettiin kuusi paineanturia sisältävä anturiletka. Paineanturi istutettiin piirilevylle, jolle rakennettiin elektroniikka sarjaliikennettä varten. Jokaisen anturin yhteyteen asennettiin mikroprosessori, joka tallentaa anturin mittauksen muistiin ja ilmoittaa lukeman tietokoneelle sitä kysyttäessä. Sovelluksen avulla neljään signaalikaapeliin voidaan kytkeä tarvittaessa rajattomasti antureita (kuva 2.15). Jokaisella anturilla on oma osoite, jonka avulla paineanturin mittaustulos luetaan. Antureiden automaattista lukemista varten tehtiin mittausohjelma. Mittausohjelma tekee halutuin väliajoin mittauskierroksen lukien kaikki anturit vuorotellen. Anturilta luetaan paineen lisäksi lämpötila. Yhden anturin mittaustuloksen kysely kestää yhden sekunnin. Kuuden anturin lukeminen voidaan tehdä siten kuuden sekunnin välein. Prototyyppivaiheessa ei keskitytty varsinaisen mittaustulosten käsittelyohjelmiston tekemiseen, vaan kaikki lukemat tallennettiin sellaisenaan tiedostoon. Mittaustulosten käsittely tehtiin jälkikäteen erillisellä ohjelmistolla manuaalisesti. Myöhemmin on täysin mahdollista rakentaa erillinen automaattinen ohjelmisto, joka lukee mittaustiedostosta mittaustulokset ja tekee tarvittavan jatkoanalyysin. Myös mittausohjelmiston modifioiminen suoraan analysointiohjelmistoksi on mahdollista.

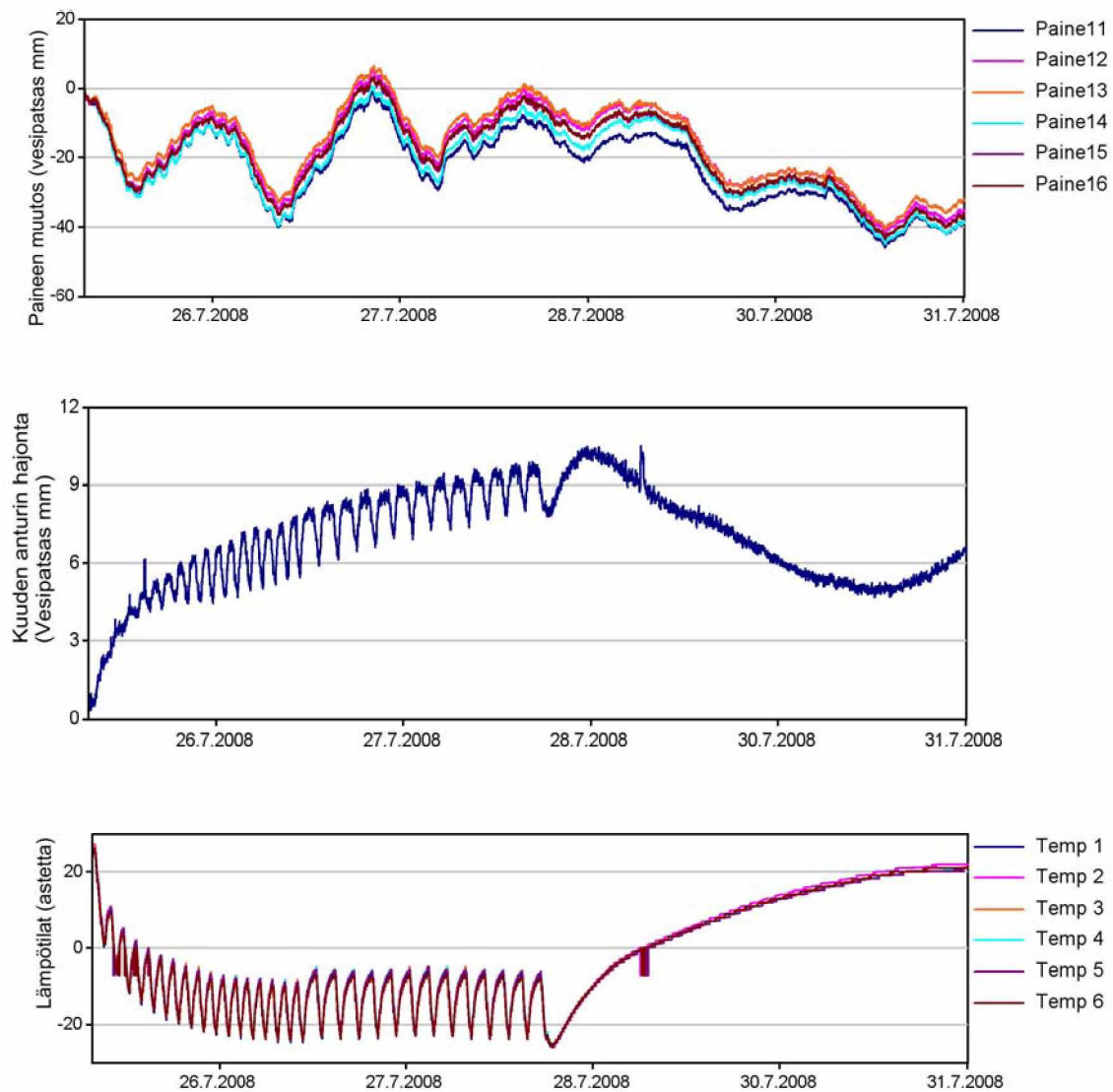


Kuva 2.15 Sarjaliikenteellä luettava paineanturipiiri. Piirilevyn koko on noin 80 x 20 mm. Itse paineanturikomponentti sijaitsee piirin keskellä ja sen halkaisija on vain 6 mm. Piirin tarvitsemaa käyttö sähköä varten on kaksi johdinta ja tietoliikenne tarvitsee toiset kaksi johdinta. Taustalla näkyvä paksumpi lanka on muovipäällystetty vaijeri, mihin signaalikaapeli on kiinnitetty nippusiteillä. Vaijerin avulla pitkäkin anturiletka voidaan vetää putken sisälle.

Kuuden anturin avulla päästiin testaamaan antureiden todellista mittaustarkkuutta painumaletkusovelluksessa. Antureita ei upotettu öljyyn, koska prototyyppivaiheessa oli odotettavaa, että kaikki ei heti toimi halutulla tavalla. Anturit laitettiin mittaamaan ilmanpainetta ja samalla aiheutettiin keinotekoisia paine- ja lämpötilamuutoksia. Kokeiden avulla havaittiin, että anturit reagoivat paineen muutokseen hyvin yhtenevästi. Antureiden ilmoittama absoluuttinen painearvo vaihteli kuitenkin antureiden kesken. Kokeiden perusteella todettiin, että anturit vaativat kalibroinnin, jos halutaan tietää penkereeseen asennettujen antureiden absoluuttinen korkeusasema millimetrien tarkkuudella. Sen sijaan, jos ollaan kiinnostuneita pelkästä painumasta, antureiden kalibrointi ei ole välttämätöntä.

Antureiden kohina oli suuruudeltaan noin 2 mm vesipatsasta (20 Pa). Kohinaa saatiin vähennettyä keskiarvon avulla. 100 peräkkäisen mittaustuloksen avulla kohinasta päästiin käytännössä eroon. Keskiarvo laskettiin mittaustuloksista jälkikäteen. Parempi vaihtoehto olisi, että anturin piirilevyllä oleva mikroprosessori laskisi keskiarvon valmiiksi ja ilmoittaisi mittaustuloksena vaikkapa 100 mittauksen keskiarvon. Tämä vaihtoehto keksittiin vasta sen jälkeen, kun ensimmäisen täyden mittakaavan kohteen piirilevyt oli tilattu ja valmistettu. Seuraavassa anturisarjassa asia kannattaa kuitenkin ottaa huomioon.

Paineanturit mittaavat absoluuttisen paineen lisäksi myös lämpötilaa. Lämpötilan avulla tehdään lämpötilakorjaus painelukemaan. Paineantureiden mittaustulos on siis lämpötilasta riippuva, mutta lämpötilakorjaus tehdään jo ennen mittaustuloksen ilmoittamista. Automaattisesta korjauksesta huolimatta pakastinkokeissa havaittiin antureissa olevan pientä ryömintää, jonka oletettiin aiheutuvan lämpötilamuutoksista. Lämpötilakorjauksia yritettiin tehdä käsin jälkeinpäin, mutta korjausten ei havaittu sanottavasti parantavan mittaustuloksia. Pakastinkokeiden perusteella arvioitiin, että antureilla on mahdollista päästä parhaimmillaan noin 20 mm mittaustarkkuuteen lämpötilavirheet otettuna huomioon. Arvio oli ehkä jopa pessimistinen, sillä pakastinkokeet olivat olosuhdemuutoksiltaan hyvin rajuja. Osa antureista oli pakastimen ulkopuolella ja osalle antureista tehtiin nopeita usean kymmenen asteen lämpötilamuutoksia. Myöhemmin havaittiin, että koejärjestelyssä oli puutteita, sillä ilmanpaine huoneilmassa ja pakastimen sisällä ei ollut kokeiden aikana välttämättä täsmälleen sama. Koe toistettiin laittamalla kaikki anturit pakastimen sisälle. Anturit sijoitettiin varmuuden vuoksi styroksiseen kylmälaukkuun, jotta varmistuttiin samankaltaisista oloista. Tämän koejärjestelyn mittaustuloksissa oli suurimmillaan 10 mm hajonta (kuva 2.16). Kokeiden perusteella lopulta arvioitiin, että paineantureilla on mahdollista päästä jopa alle 10 mm mittaustarkkuuteen. Painumaletkun mittaustarkkuuden arvioitiin olevan riittävä määriteltyn mittaustarkkuustavoitteeseen nähden.



Kuva 2.16 Paineantureiden pakastinkokeiden mittaustuloksia. Ilmanpaine muuttui tarkastelujakson aikana varsin vähän, mutta havaittavissa määrin (ylin kuva). Suurimman ja pienimmän paineen mitanneen anturin mittaustuloksen erotus oli kokeen aikana suurimmillaan noin 10 mm (keskimmäinen kuva). Noin 20 asteen lämpötilamuutokset (alin kuva) vaikuttivat paineen mittaustulokseen muutaman millimetrin verran. Lisäksi mittaustuloksissa oli hieman pitkäaikaista ryömintää, minkä aiheuttajaa ei saatu kunnolla selville.

2.5 Paimion koekohde

2.5.1 Koekohteen esittely

Projektin stabiliteettiosion keskeisenä tavoitteena oli rakentaa täysimittakaavainen koekohde, jossa parhaaksi katsottua seurantamittauslaitteistoa testataan pitkäaikaisesti. Ehdotuksia sopivaksi koekohteeksi tiedusteltiin VR-Rata Oy:n georyhmältä. Koekohde valittiin Paimiosta Rantaradalta. Rataosa oli perusparannettavana ja tästä syystä kohteella oli tehty vaaituksia. Ratakilometrin 175+000 läheisyydessä oli havaittu selkeää painumaa. Silmämääräisesti arvioituna noin 50 metrin matkalla kilometripylvään 175 kohdalla oli notkelma, joka oli ilmeisesti syntynyt konsolidatiopainuman takia. Vaaitusten mukaan penger oli painunut aikojen saatossa noin 200 millimetriä. Koekohteeksi valittiin 150 metriä pitkä osuus, joka alkaa noin km 174+900 ja päättyy km 175+050. Pohjasuhteiltaan koeosuus alkaa kallioleikkauksesta, joka vaihtuu hyvin nopeasti noin 10 metriä paksuksi savikoksi (kuva 2.17). Penkereen korkeus koeosuuden loppupäässä on noin 2,5 metriä.



Kuva 2.17 Paimion koekohteen yleiskuva ennen perusparannusta. Koekohde sijaitsee jyrkästi nousevan kallion vieressä. Rata kulkee kallioleikkauksesta noin 10 metriä paksulle savikolle. Kaarteeseen on syntynyt silmin havaittava painuma, jonka suuruus on noin 200 mm.

Koekohde valittiin juuri kyseisestä kohdasta lähinnä siksi, että kohteessa on odotettavissa painumaa jatkossakin. Varmuuserointia sortuman suhteen ei tiedetä, mutta koekohde ei lukeudu kaikkein ongelmallisimpiin kohteisiin. Koekohteen valinnassa katsottiin tärkeäksi, että jotain hallittua ja mitattavissa olevaa liikettä syntyisi tarkastelujakson aikana.

2.5.2 Instrumentoinnit

Kohteella oli perusteltua käyttää hajautettua mittausten menetelmää, jossa mittauspisteitä on koko tarkasteltavalla matkalla. Kohteeseen ei asennettu automaattista inklinometrejä juuri tästä syystä, sillä mittauspisteitä olisi tarvittu useita. Toisaalta penkereen liikesuunta olisi oletettavasti alaspäin. Painuman mittaaminen on hankalaa,

ellei jopa mahdotonta pystyyn asennettavan inklinometrin avulla. Kaupalliset hajautetut menetelmät kuten robottitakymetri -mittaus ja GPS -mittaus katsottiin liian kalliiksi menetelmiksi saavutettavaan hyötyyn nähden. Niiden tekninen toimivuus pitkällä aikavälillä arvioitiin myös puutteelliseksi. Osaltaan päätökseen vaikutti mittauslaitteistojen asiantuntijuuden puute. Pelkillä mittalaitteilla ei voida tehdä mittauksia, sillä aina tarvitaan joku luonteva taho, joka osaa toteuttaa mittaukset. Uusien kaupallisten tuotteiden osalta tätä koko ketjua ei ole välttämättä olemassa.

Koekohteella käytettävät mittalaitteet valittiin käytännössä laboratoriokokeiden perusteella. Painumaletkun käyttö oli itsestään selvää. Valokuitumittausten osalta harkittiin tehtyjen laboratoriokokeiden perusteella, onko menetelmällä mahdollisuuksia mittausten onnistumiseen. Pienestä epävarmuudesta huolimatta päädyttiin esittämään molempien mittauslaitteistojen asentamista Paimioon.

Painumaletkun valmistus ja asennus

Painumaletku valmistettiin mahdollisimman valmiiksi sisätiloissa Tampereella. Painumaletkua varten rakennettiin 50 paineanturipiiriä, jotka kiinnitettiin signaalikaapeliin 3 metrin välein. Anturit vedettiin halkaisijaltaan 40 mm vesijohtoputken sisään signaalikaapeliin liitetyn muovipäälysteisen vaijerin avulla. Painumaletkun käsittelyä ja kuljetusta varten valmistettiin halkaisijaltaan 1600 mm kela (kuva 2.18). Vesijohtoputki täytyi purkaa kiepiltä suoraksi, jotta anturit saatiin vedettyä putkeen. Avattua putkikieppiä olisi ollut mahdotonta kuljettaa ilman tarkoitusta varten tehtyä kelaä. Anturit kalibroitiin putken sisällä. Menettely varmisti saman painetason jokaisessa anturissa.



Kuva 2.18 Painumaletku kelalla odottamassa asennusta. Anturit vedettiin putken sisälle Hervannassa. Kelalla oli myös helppo tehdä anturien kalibrointi paineilman ja alipaineen avulla.

Painumaletku täytettiin öljyllä vasta Paimiossa. Ratapengertä ympäröivä maasto oli sopivasti kalteva ja letku saatiin koko matkaltaan viettäväksi. Letku täytettiin kaatamalla öljyä sisään letkun alapäästä. Ilma poistui ”ylämäkeen” nousevan öljyn edeltä mahdollisimman tehokkaasti. Öljynä käytettiin Neste Biohydrauli 32 -merkkistä öljyä. Öljy on tarkoitettu maarakennuskoneiden hydrauliikkaan toimittaessa vesistöissä. Öljy on 80 prosenttisesti ympäristöön hajoavaa, joten sitä voidaan huoletta käyttää myös rataympäristössä. Varsinaista öljyvuodon vaaraa ei ole ellei putki muun toiminnan yhteydessä rikkoudu. Edes penkereen sortuma ei oletettavasti riitä putkea rikkoamaan, sillä polyeteenistä valmistettu muoviputki on erittäin sitkeää ja joustavaa. On mahdollista, että öljy kovettaa putken ajan myötä. Pitkän ajan kuluessa on olemassa teoreettinen riski, että haurastunut putki rikkoutuu huomattavan muodonmuutoksen seurauksena. Tämänkään skenaarion toteutuessa suuria ympäristövahinkoja ei pääse syntymään, koska käytetään biohajoavaa öljyä.

Painumaletku asennettiin jätänpolun reunaan noin 300 mm syvyydelle. Letkua varten kaivettiin ura kaivinkoneella radan sivulta päin. Radan tukikerros oli juuri aikaisemmin seulottu ja seulontajäte oli purettu pengerluiskaan. Penger oli tässä yhteydessä hieman leventynyt. Painumaletku asennettiin lähestulkoon alkuperäisen luis-kan ulkoreunaan (kuva 2.19).



Kuva 2.19 Painumaletkun asennus käynnissä. Painumaletku asennettiin noin 300 mm syvyyteen penkereen ulkoreunaan jätänpolulle. Asennusta varten kaivettiin kaivinkoneella pieni ura penkereeseen.

Painumaletku on mahdollista asentaa myös kaapelauralla auraamalla. Auraus voidaan tehdä parhaiten kiskopyöräkaivinkoneella. Paimiossa ei testattu aurausta, koska painumaletkun kanssa samaan kaivantoon asennettiin myös valokuituanturi. Painumaletkun asennus auraamalla on oletettavasti melko nopeaa ja helppoa. Auraamalla pystyttäisiin upottamaan 100–200 metriä pitkä painumaletku muutamassa lyhyehkössä työraossa. Auraamalla painumaletku pystytään asentamaan aivan tukikerrok-

sen viereen. Penkereessä tapahtuvat liikkeet välittyvät siten varmemmin painumaletkuun.

Painumaletkun signaalikaapeli vedettiin lähimmän tien varteen. Maanomistajan suosituksella kohteeseen rakennettiin pieni mittauskoppi, jossa mittautietokone sai olla suojassa ja lämpimässä. Mittausta varten hankittiin sähköliittymä, joka aiheutti merkittävän osan painumaletkun kustannuksista. Painumaletkua varten olisi ollut pienin varauksin mahdollista saada sähköä myös radan turvalaitteilta. Mahdollisesti saatavilla oleva teho oli kuitenkin niin pieni, että sen avulla ei olisi voitu toteuttaa molempia mittauksia (painumaletku ja valokuitu). Mittautietokoneen kanssa kommunikointiin liikkuvan laajakaistan eli morkulan avulla etätyöyhteyttä käyttäen.

Uusien mittausmenetelmien toimivuuden arvioimiseksi kohteeseen asennettiin myös mittauspisteitä, joista penkereen (painumaletkun) painuma mitattiin vaaitsemalla. Mittauspisteitä asennettiin noin 10 metrin välein. Teräksiset mittauspisteet koostuivat 250 x 250 mm jalustasta ja 600 mm varresta (kuva 2.19). Jalusta asennettiin painumaletkun alle. Varsi jäi noin 200 mm maan pinnan yläpuolelle.



Kuva 2.20 Penkereen painuman mittauspiste vaaitusta varten.

Valokuituanturin valmistus ja asennus

Valokuitumittaukset hankittiin alihankintana Oulun yliopistolta. Sopimukseen kuului varsinaisten mittauksen lisäksi mittausmenetelmän kehittämistä käyttötarkoitukseen soveltuvaksi. Aluksi oli tarkoitus valmistaa anturikaapeli 20 metrin pituisista kaapeleista, joissa on päissä valoa osittain heijastavat liittimet. Näitä kaapeleita ketjutamalla saataisiin 160 metriä pitkä anturi. Kaapelijatkos tiedettiin epävarmaksi kohdaksi. Etenkin maan sisään tehtävissä asennuksissa vettä on aina saatavilla ja se on haitaksi liittimille. Alkuperäinen vaihtoehto hyllytettiin ja päätettiin tilata Taiwanista anturikuitu, jossa yksimittaiseen valokuituun on valmiiksi asennettuna Braggin hilat 20 metrin välein. Braggin hilojen tarkoituksena oli toimia osittaisina heijastimina liittimien tavoin. Hiloista oletettiin saatavan ominaisuuksiltaan selvästi liittimiä parempia. Yhteistyö Taiwanilaisen kuituvalmistajan kanssa osoitti erilaisten kulttuurierojen olemassaolon. Ongelmat eli lähinnä aikatauluviiveet aiheutuivat osaksi siitä, että kuituvalmistajalta haluttiin sellaista tuotetta mitä ei osattu valmistaa ja toisaalta

siitä, että kuituvalmistaja lupasi tiukoista tuotevaatimuksista huolimatta toimittaa tuotteen. Yrityksen ja erehdyksen kautta päästiin yhteisymmärrykseen millainen kuitu voidaan valmistaa ja millainen kuitu soveltuu mittaukseen. Aikaa kului prosessissa niin paljon, että talven tulon uhatessa oli pakko ottaa käyttöön alkuperäinen anturi-vaihtoehto. Taiwanin kuidutkin lopulta saapuivat mutta vasta instrumentoinnin jälkeen. Tilauksen tekemisestä antureiden saapumiseen kului aikaa lähes neljä kuukautta. Instrumentointi oli kuitenkin jo siirretty niin myöhään syksyyn, että asennus oli pakko tehdä ennen kuitujen saapumista. Asennuspäivät olivat 10. ja 11.12.2008.

Valokuitu asennettiin samaan kaivantoon painumaletkun kanssa. Valokuitu olisi ollut helppo asentaa suorana painumaletkun rinnalle, mutta suoran asennuksen ei katsottu tuovan riittävää mittaustarkkuutta. Kaapelia varten tehtiin hiekasta korkeussuuntainen siksak-muoto. Taitepisteet tehtiin hallitusti betonilla täytetyillä muoviputkillilla (kuva 2.21). Vaikka siksak asennus oli teoriassa parempi kuin suora asennus, käytäntö saattaa osoittaa toisin. Hiekasta tehty alusta todennäköisesti tiivistyy ja hakee lopulta asemaansa pitkään. Tiivistymisen takia anturikaapeliin aiheutunee pituuden muutoksia, vaikka itse pengeri ei liiku.



Kuva 2.21 Valokuidun asennus käynnissä. Valokuitu asennettiin penkereeseen siksak-muotoon noin 2,5 metrin jakovälillä. Korkeusasema vaihteli noin 300 mm. Siksak-muoto rakennettiin hiekasta ja taitepisteet kiinnitettiin muovipäällysteisten betonipainojen avulla.

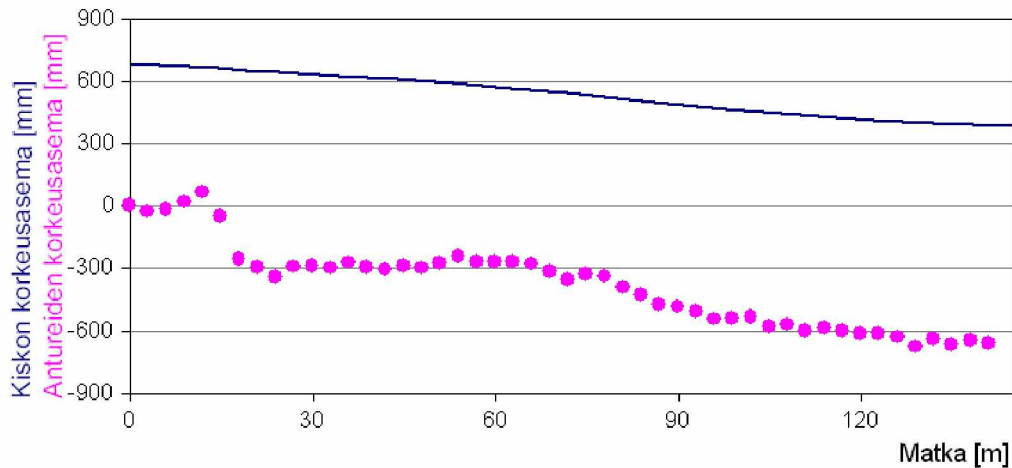
Valokuitumittauksissa käytettävää mittauslaitetta varten mittauskoppiin laitettiin jääkaappi, jonka lämpötila säädettiin sopivaksi. Mittalaite sijoitettiin jääkaapin sisälle. Mittausten onnistumisen edellytyksenä oli mittalaitteen lämpötilan pysyminen muutaman asteen tarkkuudella vakiona. Jääkaapin avulla mittalaitteen sisältä mitattu lämpötila pysyikin yhden Celsiusasteen sisällä.

2.5.3 Mittaustulokset

Painumaletku

Painumaletku saatiin mittaamaan yhtäjaksoisesti 9.1.2009. Tuolloin maa oli vielä lähestulkoon sula ja lumeton. Painumaletkun asennussyvyys vaihteli hieman siten, että letku oli lähempänä maanpintaa alussa ja letku asennettiin hieman syvemmälle seurantakohteen loppuosaa kohden (kuva 2.22). Maan pinnasta mitattuna syvyysero

oli noin 0,3 metriä. Painumaletkun todellinen korkeusasema määritettiin letkussa vallitsevan paineen perusteella. Ensimmäinen maahan asennettu anturi valittiin edustamaan korkeusasemaa 0. Letkun alkupää kuuden anturin matkalta asennettiin lapiolla tehtyyn kaivantoon hyvin lähelle maanpintaa, koska kyseisessä paikassa oli junakulunvalvonnan baliisi ja sille menevät kaapelit. Kaivua ei tästä syystä tehty kaivinkoneella. Painumaletkun pää kiinnitettiin kallioleikkaukseen, jonka tiedettiin varmasti pysyvän paikoillaan. Tosin kallioon kiinnitettyä anturia ei voitu käyttää mittaustuloksissa, sillä ilmassa lämpötilavaihtelut ja siten painevaihtelut olivat suuria.

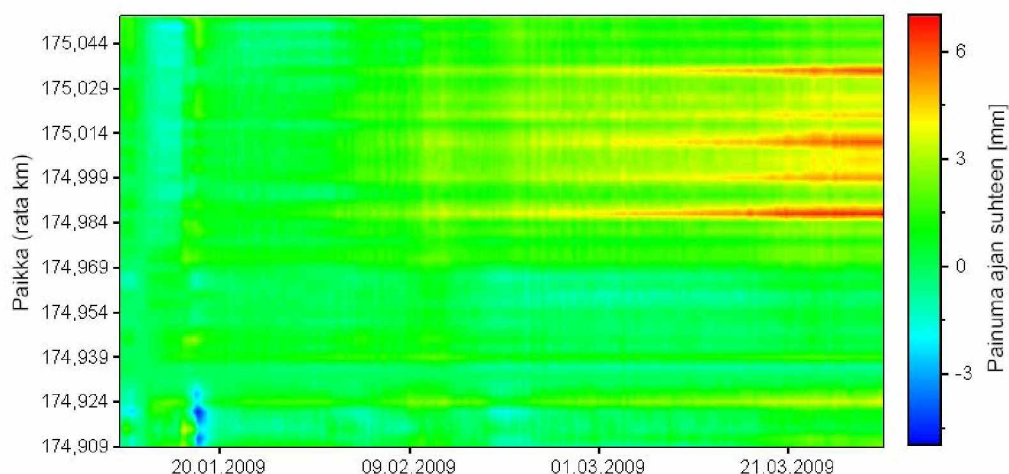


Kuva 2.22 Painumaletkun antureiden korkeusasema suhteessa kiskoon. Ensimmäinen parikymmentä metriä painumaletkusta asennettiin lapiolla. Letku jäi siksi selvästi lähemmäksi maanpintaa.

Painumien tarkastelu tehtiin suhteessa alkutilanteeseen. Siten saatiin paremmin näkyviin pienetkin korkeussuuntaiset eroavuudet. Lyhyen pakkasjakson aikana tammi-kuun puolivälissä pakkasen kiristyi nopeasti ja penger routaantui. Pakkasjakso kesti muutaman päivän ja lämpötila kohosi uudelleen suojan puolelle. Asennussyvyyden vaihtelun vaikutuksesta lämpötila laski aluksi alemmas letkun alkupäässä kuin loppupäässä. Suojalle mentäessä tilanne oli päinvastoin. Tästä aiheutui selvästi havaittava paineen muutos. Näytti siltä kuin letkun loppupää olisi ensin kohonnut muutamien millimetrin hyvin lyhyessä ajassa ja sitten vastaavasti painunut saman verran. Tarkan analysoinnin jälkeen selvisi, että muutos oli aiheutunut pääasiassa letkussa olevan nesteen tiheyden muutoksista. Letkun alkupäässä neste oli pakkasjakson aluksi kylmempää ja siten raskaampaa. Lämpötilagradientin kääntyessä tilanne oli päinvastainen. Osa paine-erosta aiheutui nesteen virtausvastuksesta. Lämpötilan aiheuttamat nesteen tilavuusmuutokset tasataan pohja-alaltaan suuressa astiassa letkun alkupäässä. Pitkä painumaletku aiheuttaa kuitenkin virtausvastusta, joka voi aiheuttaa muutaman millimetrin korkeuseroa vastaavan paine-eron putken päiden välille. Näin saattaa käydä silloin, kun lämpötilamuutokset ovat nopeita.

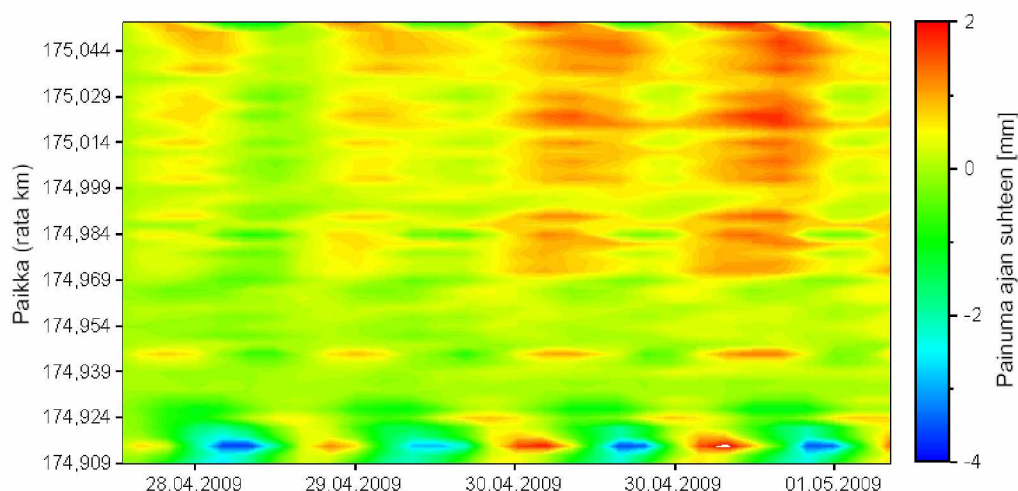
Lumipeitteen saapumisen jälkeen tilanne tasaantui lähes kolmeksi kuukaudeksi eikä suuria lämpötilaeroja tai niiden aiheuttamia paine-eroja havaittu ennen roudan sulamista huhtikuun puolessa välissä. Tämän kolmen kuukauden ajanjakson aikana penger painui loppuosaltaan painumaletkun mukaan noin 4–5 mm (kuva 2.23). Tuloksissa oli toki yksittäisten antureiden välillä hajontaa, mutta letkun puolivälin jälkeen painumakartalla oli selvästi alueita, jota kertoivat painumasta. Letku alkaa kuvan alareunasta ja päättyy kuvan yläreunaan. Punainen väri ilmoittaa painumasta ja sininen noususta. Aika kulkee kuvassa vasemmalta oikealle. Kuvassa näkyy myös tammikuun

puolivälissä ollut nopea pakkasjakso. Lämpötilamuutosten aiheuttamat painevaihtelut olivat korkeusasemassa muutamia millimetrejä. Mittaukset on tehty kahden minuutin välein, mutta kuvassa 2.23 on käytetty 4 tunnin keskiarvoa.



Kuva 2.23 Talvikauden painumat painumaletkun mukaan. Kuvassa on esitetty värein antureiden suhteellinen korkeusasema verrattuna alkuhetkeen. Punainen indikoi painumaa ja sininen nousua. Painumaletku ja ratapenger kulkevat kuvassa alhaalta ylös ja aika kulkee vasemmalta oikealle.

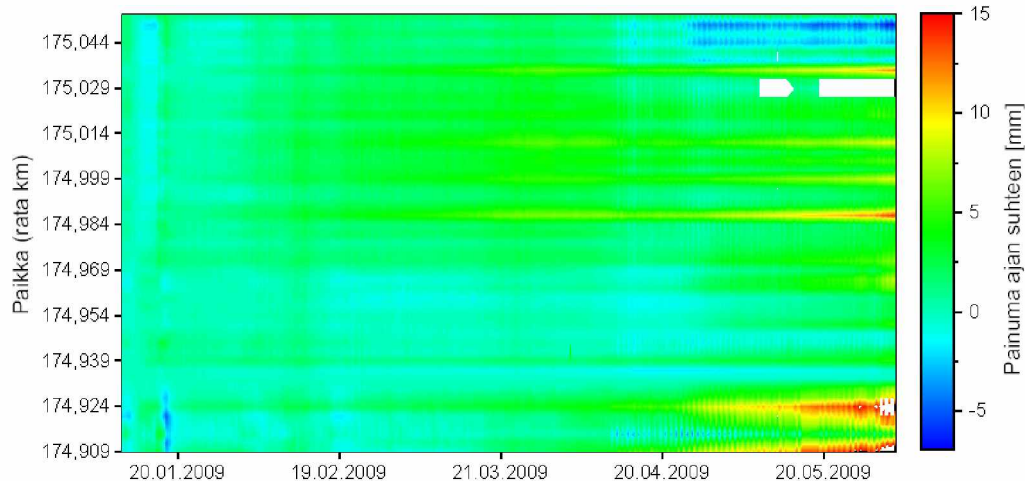
Roudan sulamisen jälkeen ulkoilman vuorokausittaiset lämpötilamuutokset olivat penkereessä suuria ja ne aiheuttivat painevaihteluita letkussa. Vuorokausittaiset lämpötilamuutokset olivat letkusta mitattuna suurimmillaan noin 10 °C ja ne aiheuttivat muutaman millimetrin muutoksia korkeusasemassa (kuva 2.24). Kuvasta huomataan, että lähellä maan pintaa sijaitsevilla antureilla iltapäivällä nouseva lämpötila näkyy korkeusaseman nousuna ja vastaavasti yöllä painumana. Syvemmillä maanpinnasta sijaitsevilla antureilla letkun loppuosassa lämpötilamuutoksen aiheuttamat ilmiöt näkyivät myöhemmin, sillä siellä lämpötila seuraa ulkoilman lämpötilaa viipeellä. Painumatarkastelut on tehty suhteessa anturiin nro 10, joka sijaitsee noin ratametrillä 174+933.



Kuva 2.24 Suuren vuorokausittaisen lämpötilavaihtelun vaikutus painumaletkun mittaustulokseen. Nesteen aiheuttama paine muuttuu lämpötilan vaikutuksesta ja se näkyy myös mittaustuloksissa.

Koko seurantajakson aikana tammi-kesäkuussa 2009 penger painui painumaletkun mukaan enimmillään noin 15 millimetriä. Suurimmat painumat mitattiin yllättäen

letkun alkuosalla, joka sijaitsee kallioleikkauksessa (kuva 2.25). Tarkastuskäynnillä havaittiin, että kohdassa missä painumaletku osoitti painumaa (km 174+924), letku asennettiin täytön varaan ja painuma oli siten mahdollinen. Aivan alussa painumaletku sijaitsi ilmassa ja mitattu painuma oli siten todennäköinen. Painumaletkun loppuosan näennäinen nousu aiheutui lämpötilamuutoksista ja siten nesteiden tiheyden muutoksista. Yksittäisten antureiden lievästi suuremmat painumat aiheutuivat oletettavasti asennuksen jälkeisestä tiivistymisestä ja letkun liikkeistä penkereen suhteen.

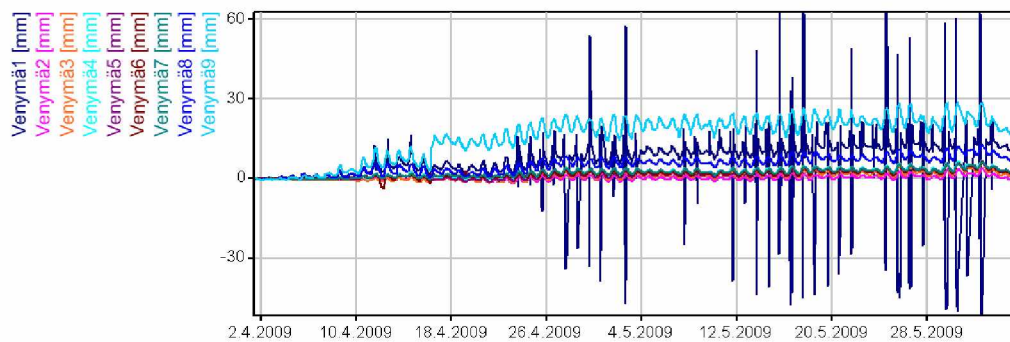


Kuva 2.25 Painumaletkun mittaustulokset kesäkuun alkuun 2009 saakka. Painuman vertailu on tehty suhteessa anturiin nro 10.

Seurantaosuuden loppupäässä, missä painumia olisi oikeasti saattanut tapahtua, havaittiin noin 6 mm keskimääräinen painuma tarkastelujakson aikana. Mittaustuloksissa oli hajontaa, sillä tulokset vaihtelivat vierekkäisten antureiden välillä haarukassa 0...13 millimetriä. Suurimmat erot syntyivät heti mittauksen alkaessa. Esimerkiksi toukokuun aikana mittaustulosten vaihtelu oli enimmillään vain noin 2 mm lukuun ottamatta letkun alkuosaa.

Valokuitumittaukset

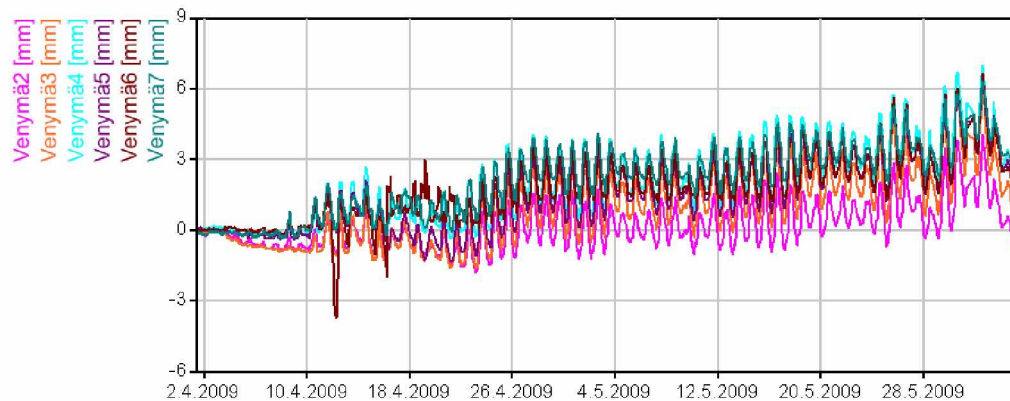
Oulun yliopisto sai valokuitumittaukset käyntiin vasta 31.3.2009. Mittauslaitteen kehittäminen vaati antureiden asennuksen jälkeen vielä useiden kuukausien työpanoksen ennen kuin laitteesta saatiin tarpeeksi stabiili pitkäaikaisia seurantamittauksia varten. Mittaukset tehtiin puolen tunnin välein. Mittausten alkaessa pengeri oli vielä jäässä ja osittain luminen ja sen seurauksena penkereen lämpötilavaihtelut olivat pieniä. Venymämittaus alkoi hyvin lupaavasti venymien pysyessä stabiileina. Pian pengeri alkoi sulaa ja lämpötilamuutokset valokuidussa kasvoivat. Lämpötilamuutokset näkyivät valokuidun vuorokausittaisina venymämuutoksina. Venymät olivat melko suuria, sillä vuorokauden aikana 20 metrin pituisten anturisegmenttien pituus vaihteli mittauksen mukaan jopa yli 100 millimetriä (kuva 2.26).



Kuva 2.26 Valokuitusegmenttien pituuden muutos ajan suhteen.

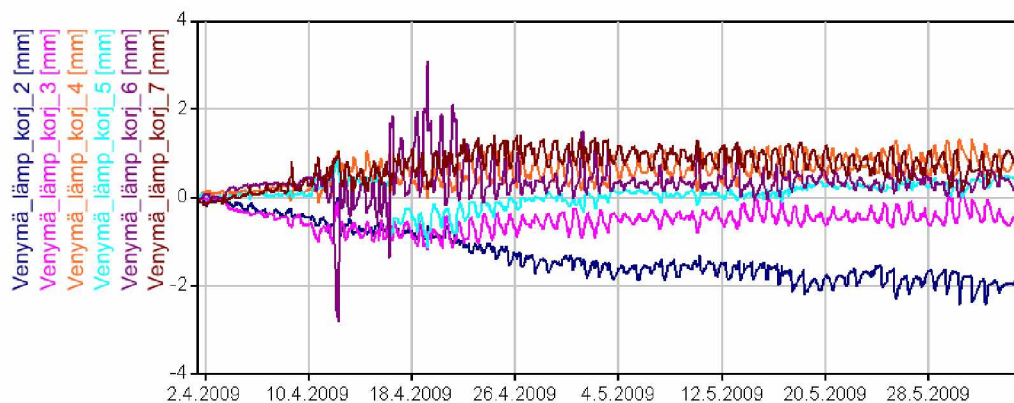
Suuret pituuden muutokset aiheutuivat menetelmässä käytettävän pulssivälin laskennasta, sillä pulssien amplitudit eivät pysyneet kaikilta osin stabiileina. Pienemmät pituuden muutokset aiheutuivat lähinnä kuidun taitekertoimen vaihteluista lämpötilan suhteen. Lämpötilakorjausta varten putkeen asennetut anturit 1 ja 9 osoittautuivat kaikista herkkimmiksi lämpötilamuutoksille, sillä ilmeisesti ilma pääsi kiertämään suojaputkessa ja muutti anturin lämpötilaa selvästi suoraan maahan asennettuja antureita enemmän.

Varsinaisten mittausantureiden (anturit 2-7) pituuden muutokset olivat selvästi vähäisempiä. Niiden vuorokausittainen lämpötilamuutos oli enimmillään noin 4 mm (kuva 2.27). Kaikki kuidut venyivät hieman tarkastelujakson aikana. Muutos aiheutui enimmäkseen lämpötilan noususta.



Kuva 2.27 Varsinaisten mittausantureiden venymämuutos ajan suhteen.

Vuorokausittainen lämpötilamuutos kompensoitiin laskemalla mittausantureiden venymistä keskiarvo ja vertaamalla yksittäisen anturin venymää siihen. Tarkastelun perusteella havaittiin, että ensimmäinen anturi oli hieman lyhentynyt, mutta muut olivat pysyneet lähestulkoon samanmittaisina (kuva 2.28).



Kuva 2.28 Lämpötilakompensoidut venymämittaustulokset ajan suhteen.

Asennustavan takia kuidun venymän muuttaminen penkereen liikkeeksi on melko epätarkkaa. Yksittäisen siksak-muodon taitepisteen liikkuminen voi aiheuttaa sekä anturin venymää että lyhenemistä. Vastaavasti kuidusta mitattu venymä voi tarkoittaa liikettä teoriassa mihin suuntaan tahansa. Jos oletetaan, että eniten venyneen mittaasanturin venymä olisi ollut yhden yksittäisen taitepisteen liikkumista alaspäin, 2 mm venymä tarkoittaisi pisteen liikkeenä noin 5 millimetriä. Tällainen liike on saattanut tapahtua, sillä anturit asennettiin varsin lähelle maanpintaa jaloin tiivistetylle alustalle. Venymä on myös saattanut aiheutua useampien taitepisteiden liikkeestä tai vain ja ainoastaan itse kuidun venymästä. Kuidut asennettiin kireälle, mutta eri anturisegmenttien jännitys on saattanut olla erilainen. Mittausmenetelmän asennustavan takia venymän muutos siirtymäksi ei ole missään nimessä eksakti. Jollakin toisella asennustavalla kuidun venymä olisi saatettu pystyä muuttamaan helpommin penkereen liikkeeksi.

Penkereen todellinen painuma

Penkereen absoluuttista painumaa seurattiin vaaitsemalla. Alkumittaukset asennuksen yhteydessä sekä kaksi seuraavaa mittausta talven aikana tehtiin tasolaserin avulla. Toisen mittauskierroksen jälkeen oltiin vielä mittauksiin tyytyväisiä, sillä pengeri oli painunut mittaustulosten mukaan vain hieman. Kolmannen mittauksen jälkeen pengeri oli painunut mittaustulosten mukaan jo niin paljon, että alettiin epäillä tasolaserin toimintaa. Tasolaserin tarkistuksessa havaittiin, että sen taseus oli epäkunnossa eikä laitteella tehtyjä mittaustuloksia voitu käyttää.

Laitteen virheen havaitsemisen jälkeen tehtiin alkumittaus vaaituskojeella 7.4.2009. Kesäkuun 10. päivänä tehtyyn seurantamittaukseen mennessä pengeri oli painunut vaaitusten mukaan 2-3 millimetriä. Lisäksi vaaittu painuma, jos sitä ylipäättään esiintyi, oli varsin tasaista. Muutoksen ei olisi siten pitänyt näkyä painumaletkussa eikä valokuidussa.

2.5.4 Mittauslaitteistojen toimivuus ja mittaustulosten luotettavuus

Painumaletku

Painumaletku toimi odotusten mukaisesti ja laitteiston prototyyppiaste huomioon ottaen erinomaisesti. Varsinaisia mittauksen keskeyttäneitä ongelmia ei esiintynyt. Painumaletkun mittaustarkkuus osoittautui olevan pitkällä aikavälillä noin 10 millimetriä. Tätä pienempienkin painumien havainnointi on mahdollista ainakin lyhyemmällä aikavälillä. Esimerkiksi toukokuun aikana mittaustulosten vaihtelu oli vain pari

millimetriä. Penkereen lämpötila vaikutti hieman mittaustuloksiin. Vuorokausittainen painuman muutos eri syvyyksillä sijainneiden pisteiden välillä oli muutamia millimetrejä. Vaihtelu aiheutui nesteen tiheyden muutoksista. Vaihtelu on mahdollista poistaa lämpötilatiedon perusteella, mutta lämpötilakompensatio vaatii melko tarkan analyysin, sillä lämpötila voi vaihdella antureittain. Siten lämpötilan aiheuttaman paineen muutoksen laskemiseen tarvitaan muun muassa tieto antureiden absoluuttisesta korkeusasemasta.

Painumaletkun mittaustulokset olivat varsin luotettavia puolen vuoden aikajänteellä. Painumaletku kannattaa jatkossa asentaa mahdollisimman syvälle, jotta lämpötilamuutokset ovat pieniä. Syvä asennus vähentää myös painumaletkuun mahdollisesti pinnalta päin aiheutettuja liikkeitä ja painumaletku siten seuraa penkereen liikkeitä luotettavasti.

Junan ylitys saattaa tuottaa yksittäisiä virheellisiä mittaustuloksia, jotka ovat suurimmillaan jopa parikymmentä millimetriä. Virhe aiheutunee oletettavasti putkeen muodostuvista paineiskuista. Tästä syystä yksittäisen mittauksen mittaustulokseen ei voi täysin luottaa, vaan tarkasteluun kannattaa ottaa aina muutama mittaus. Junan ylitykseen kuluva aika on mittauskierrokseen nähden lyhyt eikä sama juna vaikuta kahteen peräkkäiseen mittaukseen.

Tarkastelujakson aikana yksi mittausanturi lakkasi toimimasta oltuaan öljykylvyssä 5 kuukauden ajan. Anturi jatkoi toimintaansa muutaman päivän tauon jälkeen, mutta lopetti toimintansa uudelleen. Puolen vuoden kohdalla toinenkin anturi temppuili muutaman päivän ajan, mutta jatkoi jälleen toimivana. Antureiden pitkäaikaiskestävyyden toteamiseen ei liene muuta käyttökelpoista tarkastelutapaa kuin jatkaa seuranta pidempään.

Painumaletkuun tehtiin 10.6.2009 tapahtuneen tarkastus- ja vaaituskäynnin yhteydessä pieniä siirtymiä lapiolla. Letku reagoi korkeusaseman muutoksiin odotetusti. Etenkin letkun painumat tuottivat yhtenevän muutoksen vaaitusten kanssa. Lähellä painumaletkun alkupäätä tehty nosto aiheutti odotetun kaltaisen muutoksen kyseiseen anturiin, mutta painumaletkun loppuosa ”painui” puolet tehdystä muutoksesta. Tämä aiheutui siitä, että letkun nosto syrjäytti nestettä helpompaan suuntaan ja painetaso letkun loppuosalla nousi. Tilanne olisi luultavasti tasoittunut muutaman tunnin kuluessa, kun ylimääräinen neste olisi virrannut letkun alkupäässä olevaan tassaustiaan.

Painumaletkun pitkäaikaisseurannan havainnot on esitetty liitteessä 1.

Valokuitumittaus

Valokuitumittaus toimi teknisesti hyvin, sillä ongelmia ei esiintynyt. Tätä kirjoitettaessa mittaus oli toiminut yhtäjaksoisesti 2,5 kk. Mittaustuloksista havaittiin, että tiedossa ollut lämpötilariippuvuus oli merkittävää. Lämpötilakorjausta varten asennetut referenssikaapelit eivät kuitenkaan toimineet odotetulla tavalla. Lämpötilakorjaus tehtiin peräkkäisten mittaussegmenttien avulla. Mittausmenetelmän käytännöllinen mittaustarkkuus oli lämpötilakorjaus tehtynä noin 1 mm venymää. Penkereen liikkeenä kyseinen venymä voi tarkoittaa erilaisia matkoja liikkuvan massan laajuudesta riippuen. Yhden millimetrin mittaustarkkuudella venymän suhteen, laitteistolla on mahdollista antaa hälytys sortuman tapahduttua, mutta ennakoivaksi mittausmenetelmäksi valokuitumittaus soveltuu heikosti. Menetelmästä tekee heikon sen kyvyttömyys kertoa penkereen absoluuttisen liikkeen suuruus ja suunta.

Suurimmat virhemahdollisuudet mittauksessa liittyvät heijastusamplitudien vaihteluun lämpötilan ja ajan suhteen. Käytetyt liitinheijastimet eivät olleet kaikilta osin stabiileja. Mittaus toimisi oletettavasti selvästi luotettavammin Braggin hiloilla varustetulla kaapelilla. Toinen mittaustuloksiin merkittävästi vaikuttava asia on penkereen lämpötila. Lämpötilavaihtelu voidaan kompensoida melko hyvin peräkkäisten kaapeleiden keskinäisen vertailun avulla eivätkä lämpötilavaihtelut muodostu mittaustulosten käytön kannalta määrääviksi.

Tarkastuskäynnin yhteydessä kesäkuussa penkereeseen tehtiin 18 mm ”painuma” lyhyelle matkalle pudottamalla yhtä siksak-muodon taitepistettä. Muutos näkyi kyseisen mittaussegmentin 3,75 mm venymänä. Taitepiste oli korkealla sijaitseva taite, joten teorian mukaan liikkeen olisi pitänyt aiheuttaa kuidun lyhenemistä. Todennäköisesti venymä aiheutui testin yhteydessä tapahtuneista liikkeistä sivusuunnassa. Hieman arvelujen varaan jäi, oliko kuidussa enää puoli vuotta asennuksen jälkeen asennuksessa tuotettua esijännitystä jäljellä. Kuidun lyheneminen edellyttää, että kuitu on esijännitetty ja lyheneminen aiheutuu jännityksen vähenemisestä. Oletettavasti kuitu toimii pitkäaikaisessa asennuksessa hyvin vain kuidun pitenemistä indikoivana hälyttimenä.

Oulun yliopiston elektroniikan laitoksen tuottama raportti mittauksista on esitetty liitteessä 2.

3 Roudan monitorointi

3.1 Mittaustarpeen kuvaus

Ratarakenteen routimattomuus on radan tasaisuuden ja siten radan liikennöitävyyden kannalta erittäin tärkeää. Radan rakennekerrosmateriaalit on valittu aikansa käytäntöjen mukaan siten että valinnoissa on yleensä tavoiteltu materiaalien routimattomuutta. Rakennekerrosmateriaalien valinta on kuitenkin ollut silmämääräistä aina 1960-luvulle saakka. Suurin osa näistä materiaaleista on edelleen ratarakenteissa. Ratarakenteisiin on siten saatettu laittaa materiaaleja, jotka eivät täytä nykypäivän routimattomuusvaatimuksia. Ratarakenteista on otettu lukuisia näytteitä, joita on analysoitu laboratoriossa. Esimerkiksi routanousukokeissa osa näytteistä on todettu routiviksi (Saarinen 2008). Routivia näytteitä on löydetty myös kohteista, joissa ei ole havaittu routimista.

Ratarakenteen routimattomuuden kriteerien täsmentämiseksi ja kalibroimiseksi on syntynyt tarve kehittää yksinkertainen mittausjärjestely, jonka avulla voidaan mitata roudan syvyys ja routanousun suuruus kentällä. Mittausjärjestelyn tulee olla niin helppokäyttöinen, että sitä voidaan tarvittaessa käyttää suunnittelun apuna normaalissa radan perusparantamisessa. Mittausjärjestelyn avulla tulisi pystyä arvioimaan radan routiva rakennekerros. Toisaalta mittausjärjestelyn pitäisi toimia perustana arvioitaessa tarvittavaa ratarakenteen kokonaispaksuutta ja routasuojaustarvetta.

Mittausjärjestelmälle asetettiin seuraavia teknisiä vaatimuksia

- Täysin automaattinen mittausjärjestely
- Järjestelmän on toimittava akuilla vähintään talven ajan
- Lämpötilan mittaustarkkuus 0,1 °C
- Routanousun mittaustarkkuus 1 mm.
- Ainakin osassa kohteista langaton tiedonsiirto

3.2 Saatavissa olevia kaupallisia sovelluksia

Metyleenisiniputket

Perinteisesti roudan syvyyttä on havainnoitu metyleenisiniputkien avulla. Metyleenisini on liuos, joka muuttaa väriä jäätyessään 0 celsiusasteen kohdalla. Jäätynyt liuos on läpinäkyvää ja sula liuos on sinistä. Mittaukset metyleenisiniputkien avulla ovat käsikäyttöisiä. Putki poistetaan rakenteesta luennan ajaksi. Esimerkiksi Suomen ympäristökeskus käyttää edelleen metyylininiputkia roudan syvyyden määrittämiseen. Vaikka menetelmä onkin toimiva, on se nykYTEKNIKAN mahdollisuuksiin nähden vanhanaikainen.

FinMeasin lämpötilaprofiili

Roudan syvyys voidaan määrittää lämpötilan perusteella, kuten se oikeastaan tapahtuu metyleenisiniputkenkin tapauksessa. FinMeas on kehittänyt digitaalisiin lämpötila-antureihin perustuvan mittausmenetelmän, joka on tarkoitettu juuri maaperän lämpötilaprofiilin mittaamiseen. Menetelmässä käytetään osoitteellisia digitaalisia antureita, joita voidaan kytkeä sarjaan kolmen johtimen avulla periaatteessa rajattomasti. Roudan syvyys arvioidaan lämpötilan perusteella. Digitaaliset lämpötila-

anturit tarvitsevat anturikohtaisen kalibroinnin, sillä vaadittu mittaustarkkuus ei sellaisenaan täyty. Vain harvat lämpötila-anturit täyttävät tarkkuusvaatimuksen suoraan. Kalibroinnin avulla tarkkuusvaatimus on mahdollista saavuttaa.

FinMeas myy mittalaitteiden lisäksi palvelinpalvelua. Mittalaitteet lähettävät mittaus-tulokset suoraan palvelimelle GSM-yhteyttä käyttäen. Mittaustuloksia voidaan seurata internetin välityksellä. FinMeasin tarjoama paketti on valmis tuote, joka soveltuu suoraan roudan syvyyden määrittämiseen. Heillä on mittauksista muutamia referenssejä, jotka ovat lähinnä tiekohteista.

Routanousua ei voida suoraan mitata kyseisellä mittausjärjestelmällä. Järjestelmään voitaisiin tietäen edellytyksin liittää digitaalisia siirtymäantureita. Niitä on kuitenkin valitettavan vähän saatavilla eikä niistä ole aikaisempia kokemuksia. Analogisten siirtymäantureiden mittaus edellyttäisi uusia komponentteja muuttamaan anturin signaali digitaalseksi. Analogisten anturien käyttö olisi vaatinut mittausjärjestelmän kehittämistä siinä määrin, että sitä ei katsottu olevan mahdollista toteuttaa tämän projektin puitteissa.

Perco-asema

Roudan syvyyttä voidaan arvioida Perco-aseman (Perco Station) avulla. Perco-asema koostuu antureista, jotka mittaavat lämpötilan ohella materiaalin dielektrisyttä ja sähkönjohtavuutta. Kun vesi jäätyy, maan dielektrisyys ja sähkönjohtavuus pienenevät merkittävästi. Perco-aseman avulla saadaan hieman lämpötilamittausta tarkempi mittaustulos maan routaantuneisuudesta. Esimerkiksi voimakkaasti suolattujen teiden rakenteet saattavat jäätyä vasta $-0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ asteen lämpötilassa. Savet voivat jäätyä selvästi tätäkin alemmissa lämpötiloissa. Perco-aseman hinta on merkittävästi esimerkiksi pelkkää lämpötilamittausjärjestelmää korkeampi. Perco-asemaa markkinoi Suomessa Roadscanners Oy.

Muut kaupalliset sovellukset

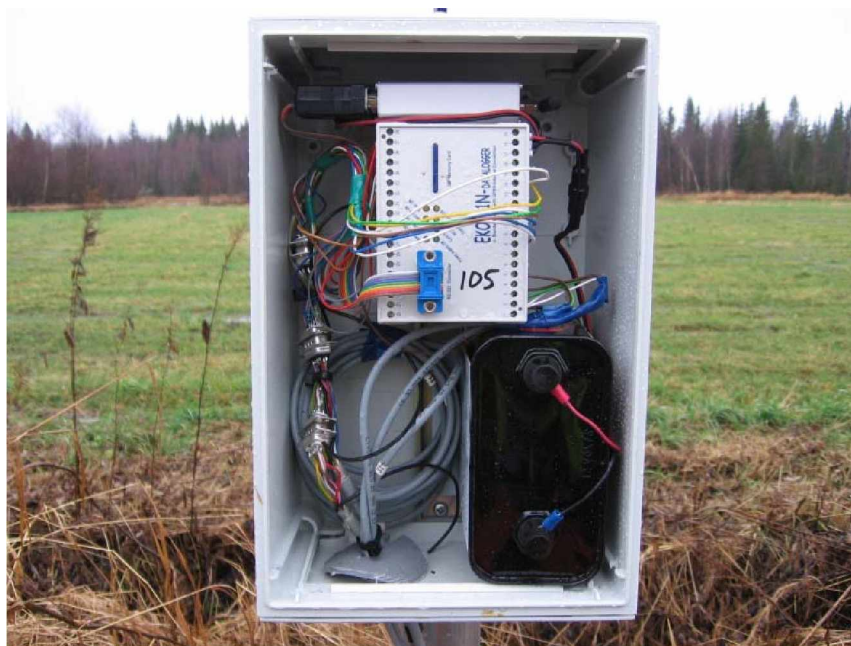
Markkinoilla on lukematon määrä erilaisia lämpötila-antureita. Monet yritykset myyvät pelkkiä antureita ja niiden lukemiseen tarvittavia mittauslaitteita, mutta eivät valmiita mittausjärjestelmiä. FinMeasin tuotteiden lisäksi valmiita maarakenteiden instrumentointiin soveltuvia järjestelmiä ei ole juuri saatavilla. Tavallisen suunnittelutoimiston resurssit eivät usein riitä rakentamaan mittausjärjestelyä alusta alkaen.

Lämpötila-antureita on helposti saatavilla eikä niiden hankinta vaadi erikoisosaamista. Valittavana on koko joukko termopari-antureita, vastus-antureita, digitaalisia antureita jne. Ongelma muodostuu vasta, kun ryhdytään miettimään millä näitä antureita luetaan ja miten tieto tallennetaan ja siirretään. Suurin ongelma useissa kaupallisissa sovelluksissa on mittausjärjestelmän tarvitsema virrankulutus. Jos on käytettävissä verkkovirtaa, niin ongelmia ei yleensä ole. Sen sijaan akkukäyttöisiä dataloggereita eli tiedon tallentamiseen tarvittavia laitteita on markkinoilla vain vähän. Aktiivisen etsinnän jälkeen löytyi vain yksi varteenotettava vaihtoehto. Hollantilainen Ekopower markkinoi dataloggeria, jonka luvataan toimivan jopa vuosia akun avulla. Dataloggeriin saa myös GPRS-modeemin, jonka avulla mittaustulokset voidaan lähettää halutulle palvelimelle.

3.3 Kehitetty mittausjärjestely

Kaupallista mittausjärjestelyä ei voitu suoraan ostaa markkinoilta. Mittausjärjestelmä olisi voitu rakentaa pienin muutoksin FinMeasin järjestelmän pohjalta, mutta käytävissä oleva budjetti ei sallinut tätä vaihtoehtoa. FinMeasin antama alustava arvio lämpötilaprofiilin mittausjärjestelyn hinnaksi oli noin 4000 €/kohde. Tästä puuttui vielä kokonaan routanousun mittaamiseen tarvittavat laitteistot. Kustannussyistä oli mietittävä muita käytettävissä olevia vaihtoehtoja.

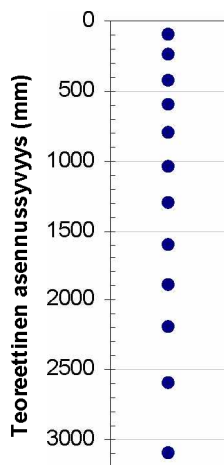
Suurin haaste oli vähän virtaa kuluttavan dataloggerin löytäminen. Vaihtoehtoja löydettiin käytännössä vain yksi, Eko21N mittalaite Ekopower nimiseltä valmistajalta. Yritys on erikoistunut ympäristöolojen mittauksiin ja erityisesti tuuliolojen mittauksiin tuulivoimaloita varten. Tähän käyttötarkoitukseen yritys on kehittänyt dataloggerin, jolla voidaan mitata akkukäyttöisesti erilaisia suureita. Sovellustamme varten yritykseltä olisi voitu hankkia myös lämpötila-anturit ja keskittyä itse ainoastaan routanousun mittaamiseen. Lämpötila-anturit olisivat vaatineet tietynlaiset mittauskanavat. Melko hintavien dataloggereiden hankinnassa ei haluttu sitoutua tietyn tyyppiseen anturiin. Laitteet hankittiin yleiskäyttöisellä 0-5 voltin mittausalueella. Tästä syystä Ekopowerilta hankittiin ainoastaan 6 dataloggeria (kuva 3.1) ja anturit hankittiin erikseen. Näistä dataloggereista viisi varustettiin GPRS-tiedonsiirrolla. Viialan dataloggeri yhdistettiin tietokoneeseen ja datat luettiin sen välityksellä. Dataloggerien ominaisuudet räätälöitiin käyttötarkoitusta vastaavaksi. TTY:n versioihin hankittiin 16 analogista mittauskanavaa ja yksi syöttöjännitteen ulostulo. Lisäksi dataloggeriin tuli yksi kanava pariston jännitteen mittausta varten. Virrankulutus saatiin minimoitua ohjatun syöttöjännitteen avulla. Anturien käyttöjännitettä syötetään dataloggerin avulla ainoastaan 0,25 sekunnin ajan mittaustapahtuman yhteydessä. Mittaus- ja tallennusväli on vapaasti valittavissa.



Kuva 3.1. Akkukäyttöinen dataloggeri varustettuna gprs-tiedonsiirrolla. Dataloggerilla voidaan mitata lämpötiloja ja routanousua 13 Ah pariston avulla noin vuoden ajan kerrallaan. Mittausdata lähetetään langattomasti halutulle palvelimelle.

Roudan syvyyden mittaaminen perustuu lämpötilan mittaukseen. Aikaisempien kokemusten perusteella tiedettiin, että halvin tapa mitata lämpötiloja on käyttää elektroniikkateollisuuden puolijohdeantureita (esim. LM335). Yksi anturi maksaa vain pari euroa. Antureiden hinta muodostuu siten muista anturointiin liittyvistä materiaali- ja työ kustannuksista. Mittausjärjestelmässä oli käytössä 16 mittauskanavaa. Näistä kaksi varattiin routanousun mittausta varten, yksi mittausjärjestelyn kannalta tärkeälle syöttöjännitteelle ja yksi ulkoilman lämpötilaa varten. Jäljelle jäi 12 kanavaa roudan syvyyden mittausta varten.

Lämpötilavaihtelut ovat suurimmat ilmassa ja vaihtelu vähenee syvemmälle rakenteeseen mentäessä. Tutkimuksen kannalta oli tärkeää mitata rakennekerrosten routaantumista. Toisaalta haluttiin tietää routaraja siinäkin tapauksessa, että routa tunkeutuu rakennekerroksia syvemmälle. Oletuksena oli kuitenkin, että routa ei voi tunkeutua kolmea metriä syvemmälle. Anturisijoittelu räätälöitiin näiden reunaehtojen avulla mahdollisimman hyvin vastaamaan mittaustarvetta. Anturit sijoitettiin kuvan 3.2 esittämälle jaolle kahteen erilliseen anturisauvaan. Ensimmäiseen sauvaan asennettiin 7 anturia ja toiseen 5 anturia. Anturointi jaettiin kahtia kolmesta eri syystä. Kolme metriä pitkän anturisauvan kuljettaminen on hankalaa, mahdollinen routanousu kohtelee hellempin lyhempiä sauvoja ja jos sauvan asentaminen täyteen syvyyteen saakka epäonnistuu, voidaan ylempien mittaustasojen anturisauva asentaa eri asennusreikään. Anturisauva rakennettiin 16 mm sähköputkesta. Anturit kiinnitettiin putkeen valumuovin avulla. Anturisauvasta tuli siten yhtenäinen muovitanko, jossa anturit ovat vesitiiviissä paketissa. Vastaavaa anturointitapaa on käytetty lukuisissa TTY:n aiemmin tekemissä lämpötilainstrumentoinneissa.

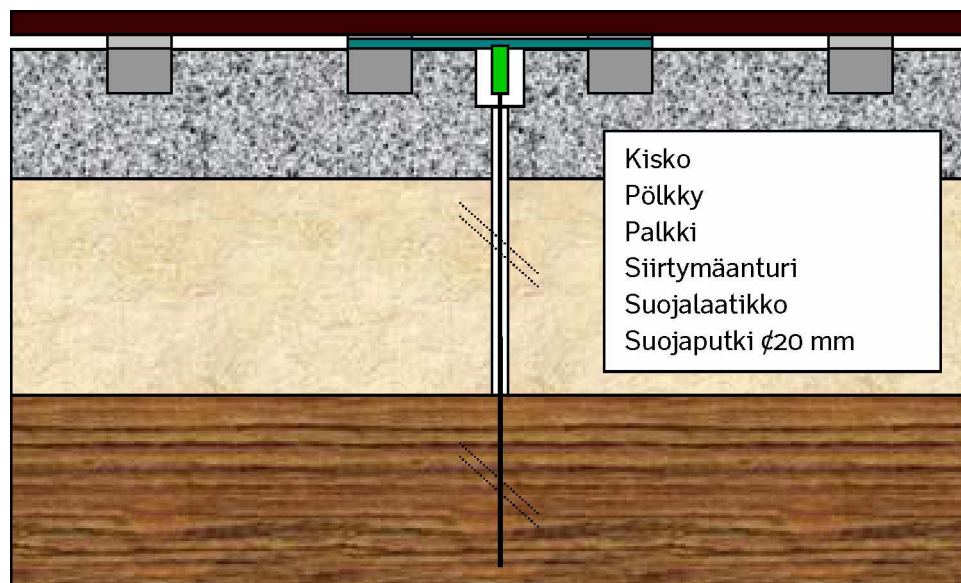


Kuva 3.2 Lämpötila-antureiden teoreettiset asennussyvytydet.

Roudan syvyyden määrittämiseksi lämpötilan mittaustarkkuus on oltava vähintään $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tärkein mittaustarkkuuteen vaikuttava tekijä on antureiden kalibrointi. Jokainen anturi on yksilö ja tarvitsee yksilöllisen kalibroinnin. Antureiden kulmakerroin on lähes vakio, mutta kulmakerroin riippuu hieman signaalikaapelin pituudesta. Antureiden nollakohta vaihtelee enemmän, tyypillisesti pari astetta. Valmiit kaapelilla varustetut anturisauvat kalibroitiin vesihäuteen avulla kolmessa eri lämpötilassa. Nollan asteen lämpötilaa tavoiteltiin jäämurskan avulla. Tarkalleen nollan asteen saavuttaminen oli hyvin vaikeaa, sillä kun jäästä alkoi sulaa vettä, oli veden lämpötila jo pian suurempi kuin $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ astetta. Lämpötilan tasaamiseksi vettä kierrätettiin kalibrointias- tiassa pumpun avulla. Siten saatiin aikaiseksi noin $+0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ asteinen varsin pitkään

tasaisena pysynyt lämpötila. Kalibrointialtaan lämpötila mitattiin kalibroidulla elohopealämpömittarilla, jonka lukemataarkkuus oli 0,05 °C astetta. Toinen kalibrointilämpötila oli huoneenlämpö eli noin +20 °C. Kolmas kalibrointi tehtiin noin +40 °C asteen lämpötilassa. Vastaava kalibrointi tehtiin myös ulkoilman lämpötila-antureille.

Routanousun mittaamiseksi tarvitaan paikallaan pysyvä kiintopiste. Yleisesti ottaen absoluuttisesti paikallaan pysyvän kiintopisteen rakentaminen rataympäristöön on hyvin hankalaa. Luotettava kiintopiste voidaan rakentaa kovaan pohjaan asennettujen kairatankojen avulla. Kovan pohjan tavoittaminen voi olla työlästä, etenkin jos instrumentoitavat kohteet sijoittuvat paksuille pehmeiköille tai korkeille penkereille. Instrumentoinnin kannalta tärkeimmäksi asiaksi katsottiin radan rakennekerrosten routanousun mittaaminen. Rakennekerrokset ovat vanhoilla radoilla noin 2 metriä paksut. Oletuksena oli myös, että ratarakenne jäätyy maksimissaan vain noin 2 metrin syvyyteen. Kolme metriä pitkällä ankkuritangolla, joka on 2 metrin matkalta yläosastaan erotettu maakerroksista, oletettiin saavutettavan riittävän tarkasti paikallaan pysyvä kiintopiste. Alun perin mittausjärjestelyksi kaavailtiin kuvan 3.3 mukaista mittausjärjestelyä. Mittausjärjestely yksinkertaistettiin pölkyn kiinnityksen osalta kuvan 3.4 mukaiseksi. Routanousun havaintolaitteet asennettiin pölkyn molempiin päihin. Siirtymäantureina käytettiin Novotechnik TRS 50 antureita.



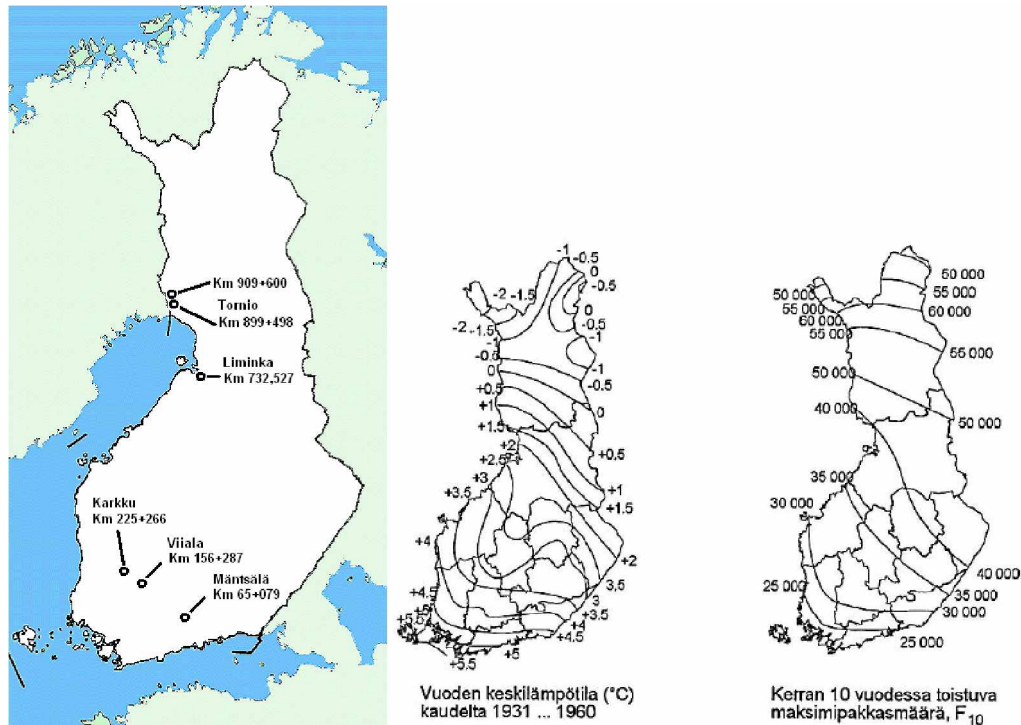
Kuva 3.3 Periaatekuva radan rakennekerrosten routanousun automaattisesta mittaamisesta.



Kuva 3.4 Radan rakennekerrosten routanousun mittaamista varten rakennettu mittaajajärjestely. Ratapölkyn päähän asennettiin täryttämällä kolme metriä pitkä terästanko. Tanko sijoitettiin suojaputkeen 2 metrin syvyyteen saakka. Ankkuritangon yläpäähän kiinnitettiin vastinkappale siirtymäanturia varten. Siirtymäanturi kiinnitettiin suoraan ratapölkkyyn. Anturin muovinen suojakotelo kiinnitettiin pölkkyyn siten, että kiinnitys mahdollistaa ratapölkyn parin millimetrin dynaamisen liikkeen ilman kotelon liikkeitä. Anturi asennettiin siten, että mahdollinen routanousu liikuttaa anturin karaa väkisin, vaikka anturi olisi vähän kuurassa. Anturia pääsee kätevästi huoltamaan kierteillä olevan kotelon kannen kautta (kansi puuttuu kuvasta).

3.4 Routaseurantakohteet

Routaseurantakohteita rakennettiin kaikkiaan kuusi kappaletta. Näistä viisi sijoitettiin vanhoille sorasta rakennetuille ratapenkereille ja yksi sijoitettiin murskatuista kiviaineksista rakennetulle Oikoradalle. Oikorata haluttiin mukaan lähinnä vertailun vuoksi, sillä haluttiin selvittää miten paljon murskattu kiviaines vaikuttaa lämpöoloihin. Oikoradan rakenteen ei oletettu routivan, joten sinne asennettiin ainoastaan lämpötilamittaus. Koekohteet sijoitettiin maantieteellisesti mahdollisimman kattavasti (kuva 3.5). Kohteet valittiin aikaisempien vuosien routapaikkatietojen perusteella. Kaikissa kohteissa Oikorataa lukuun ottamatta oli ilmennyt epätasaisuutta joidenkin edellisten talvien aikana.



Kuva 3.5 Routaseurantakohteet ja tilastotietoa Suomen ilmastosta. Etelä-Suomen kohteet sijaitsivat ilmastoltaan samankaltaisissa oloissa. Sekä vuoden keskilämpötila että odotettavissa oleva pakkasmäärää vastasivat näissä kohteissa toisiaan. Pohjoisen kohteet sijaitsivat selvästi kylmemmässä ilmastossa. Vuoden keskilämpötila oli niissä tilastojen mukaan 2-3 astetta alhaisempi ja pakkasmäärä lähes kaksi kertaa suurempi (Ehrola 1996).

Instrumentoinnit aloitettiin pohjoisesta. Tornion kohteet rakennettiin 27.10.2008 ja Limingan kohde seuraavana päivänä. Asennushetkellä ratarakenne oli vielä täysin sula. Routaantuminen alkoi jo muutaman päivän kuluttua asennuksesta. Instrumentoinnit jätettiin myöhään syksyyn tarkoituksella. Näin pyrittiin turvaamaan paristojen kesto koko talven yli. Viialan koekohde rakennettiin 10.11.2008 ja Karkun koekohde 13.11.2008. Molemmat kohteet olivat asennushetkellä täysin roudattomia. Samoihin aikoihin tapahtuneiden Paimion painumanseurantakohteen valmistelujen takia Oikoradan lämpötilainstrumentointi viivästyi aina 18.12.2008 saakka. Oikoradan rakennekerrosmateriaalit olivat asennushetkellä maanpinnasta selvästi nollan alapuolella. Hienorakeinen maa radan leikkausluiskassa oli jässä noin 10 cm paksuudelta. Oikoradalta ei näin ollen saatu mitattua talven pakkasmäärää aivan alusta alkaen. Instrumentoinneissa toteutuneet anturisyyvydet pölkyn yläpinnasta mitattuna sekä mittaukseen käytetty dataloggeri on esitetty taulukossa 3.1.

Taulukko 3.1 Routaseurantakohteiden lämpötila-antureiden asennussyvyydet ja data-loggerin numero.

Rataosa	Viiala-Mattila	Karkku-Suoniemi	Kempele-Liminka	Tornio-Niemenpää	Tornio-Niemenpää	Mäntsälä-Sipilä
Rata-km	156+287	225+266	732+527	899+498	909+600	65+079
Dataloggeri	N96	N104	N103	N105	N106	N102
Syvyys	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(cm)
Anturi						
T1	10	10	10	10	10	10
T2	25	25	25	25	25	25
T3	42	42	42	42	42	42
T4	60	60	60	60	60	60
T5	80	80	80	80	80	80
T6	105	105	105	105	105	105
T7	130	130	130	130	130	130
T8	160	140	160	127	160	114
T9	190	170	190	157	190	144
T10	220	200	220	187	220	174
T11	260	240	260	227	260	214
T12	310	290	310	277	310	264

Ulkoilman lämpötilaa mitattiin kaikissa kohteissa noin 1,5 metrin korkeudelta maan pinnasta. Ulkoilman lämpötila-anturi sijoitettiin monikerroksisen lämpökilven sisään. Lämpökilven avulla estettiin auringon vaikutus mittaustulokseen ja mittaustapahtuma vastasi mittausta varjosta. Kuvassa 3.6 on esitetty esimerkkikuva Karkun koekohteesta km 225+266. Dataloggeri sijoitettiin pääsääntöisesti kuvasta poiketen penkereen juureen tai leikkausluiskaan. Karkussa jätkepolulla oli riittävästi tilaa tiedonkeruuta varten. Kaikki raiteeseen asennetut laitteet sijoitettiin maan pinnan alapuolelle. Ainoastaan routanousua mittaavien siirtymäantureiden suojakoteloiden punaiset kannet näkyvät aivan lähietäisyydeltä. Mittauskohde merkattiin maastoon aurausviitojen avulla. Merkintä tehtiin mahdollista tukikerroksen puhdistusta varten, sillä maahan kolme metriä syvälle saakka asennetut halkaisijaltaan 16 mm terästangot on syytä poistaa ennen seulontaa.



Kuva 3.6 Karkun routaseurantakohde km 225+266. Kuvassa vasemmalla näkyy tolpan päähän sijoitettu tiedonkeruuyksikkö ja ulkoilman lämpötila-anturi.

Lämpötilamittaussauvat asennettiin raiteen keskelle ratapölkkyjen väliin. Asennus tehtiin poravaralla asennettujen painokairatankojen jättämään reikään. Suurimassa osassa kohteista kairausreikä pysyi melko hyvin auki kairojen poistamisen jälkeen. Suurimmat ongelmat ilmenivät Oikoradalla, missä rakennekerrokset on rakennettu murskatuista materiaaleista. Kairan poistaminen käänsi kiviä lähes poikkeuksetta ja kivet tukkivat reiän. Lukuisten yritysten jälkeen sauvat saatiin asennetuksi lähes haluttuun syvyyteen. Karkun kohteessa korkealla, noin 1,5 metrin syvyydellä, sijainnut pohjavedenpinta aiheutti vähän samankaltaisen ongelman. Kairareikä liettyi heti kairan poistamisen jälkeen tukkoon. Korkealla penkereellä sijainneissa kohteissa ei sen sijaan ollut asennusongelmia. Asennusreikä täytettiin hiekkapuhallushiekalla muissa paitsi Oikoradan kohteessa. Kuvassa 3.7 on asennusreiän teko käynnissä Oikoradalla.



Kuva 3.7 Lämpötilainstrumentoinnin asennus käynnissä. Lämpötilasauvoja varten tehtiin reikä poravaralla ja kairatangoilla raiteen keskilinjalle ratapölkkyjen väliin.

Routanousun havaintotangot asennettiin niin ikään kairatangoilla tehtyihin noin 2 metriä syviin alkureikiin. Kolme metriä pitkä ankkuritanko pystytettiin asentamaan alkureiän avulla yksimittaisena. Ankkuritanko tärytettiin lopulliseen asemaansa poravaralla.

3.5 Mittauslaitteistojen toimivuus ja mittaustulosten luotettavuus

Routaseurantakohteiden mittausanturit olivat entuudestaan tunnettuja ja niiden ominaisuudet tiedettiin luotettavaksi. Varsinaisia laiteteknisiä ongelmia ei juuri ilmennyt havaintojakson aikana. Routanousua mittaavat siirtymäanturit olivat monessa kohteessa hetkellisesti kuurassa tai kostuneena, mikä aiheutti selvän mittausvirheen. Virhe oli kuitenkin niin suuri, että se havaittiin helposti ja se poistettiin mittaustuloksista. Ongelma poistui itsestään jonkin ajan kuluttua ilmeisesti lämpötilamuutosten vaikutuksesta.

Viialan kohteessa yksi siirtymäantureista lakkasi mittaamasta kesken talven. Asennuksen yhteydessä anturin johdinliitin oli jäänyt ilmeisesti löysälle. Lisäksi johdin oli jäänyt liian kireälle. Rauta nosti pölkkyä ja anturia, johdin kiristyi ja lopulta irtosi anturista. Ongelma korjattiin, mutta tässä yhteydessä anturin kiinnitys ratapölkkyyn jäi löyhälle ja anturi irtosi myöhemmin puolestaan ratapölkystä. Tämäkin ongelma korjattiin aikanaan, mutta useiden mittauskatkosten takia routanousun suuruutta ei

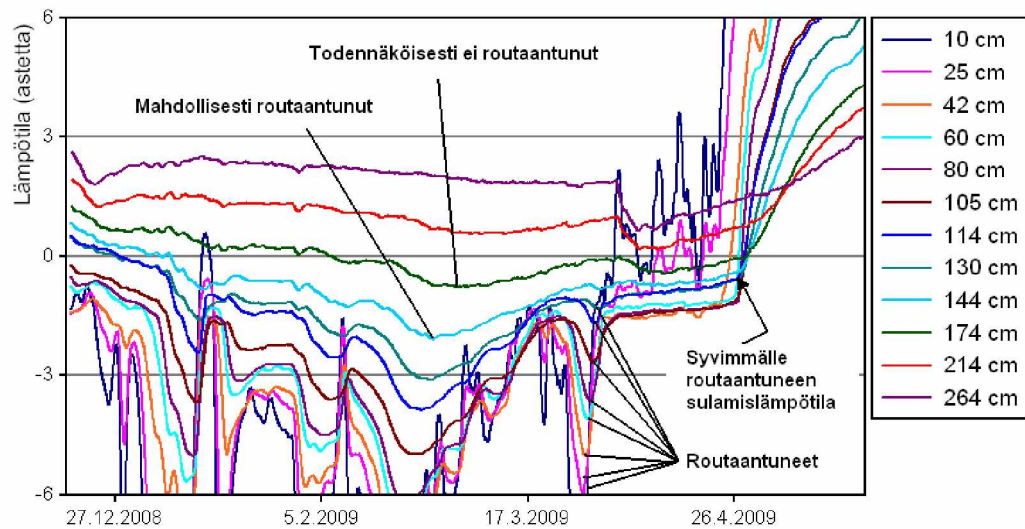
pystytty kyseisen anturin perusteella luotettavasti määrittämään. Samassa ratapölkössä oli kaksi muuta anturia, joiden avulla routanousu määritettiin. Vastaava anturin kaapelin irtoaminen tapahtui myös Karkun kohteessa, mutta vasta roudan sulamisen jälkeen.

Ennakolta suurin huolenaihe oli dataloggereiden pitkäaikaistoimivuus. Huoli osoitautui turhaksi, sillä kaikki dataloggerit toimivat lähes moitteetta koko talven ajan. Ainut havaittu ongelma oli Karkussa sijaitsevassa dataloggerissa. Sen lähettämät mittaustulokset alkoivat jo pian asennuksen jälkeen vähentyä. Tarkastuskäynnillä ei löydetty varsinaista vikaa, mutta ongelma korjaantui ohjelmiston uudelleen asennuksella. Dataloggeri oli kuitenkin mitannut muistiin odotetusti, mutta datojen lähetys GPRS-yhteyttä pitkin ei ollut täydellistä.

Merkittävä mittaustulosten oikeellisuuteen vaikuttava asia ilmeni vasta talven jälkeen maaliskuussa, kun ulkoilman vuorokausittaiset lämpötilavaihtelut olivat suuria. Havaittiin, että ulkoilman lämpötila vaikutti hieman lämpötilan mittaustulokseen. Virhe syntyi ilmeisesti dataloggerissa analogista signaalia muunnettaessa digitaalseksi. ulkoilman lämpötila vaikutti ilmeisesti muuntimen ominaisuuksiin. Virheen suuruus ei ollut dataloggerille luvattuihin arvoihin nähden poikkeava, mutta virhe vaikutti selvästi arvioituun routarajan syvyyteen. Ulkoilman lämpötilamuutos aiheutti noin $0,01^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{C}$ mittausvirheen lämpötiloissa. Dataloggerin oletettiin mittaavan oikein $+20^{\circ}\text{C}$ lämpötilassa. Virhe saattoi kovimmilla pakkasilla olla siten jopa $0,5^{\circ}\text{C}$. Syväällä maassa lämpötilagradientti on pieni ja $0,5^{\circ}\text{C}$ mittausvirhe saattoi siirtää routarajaa pahimmillaan jopa kymmeniä senttimetrejä. Varsinaista mittausvirheen korjausta ei tehty, koska lopulta olisi saatettu ajautua tilanteeseen, missä ei enää tiedetä mihin mittaustulokseen voi luottaa. Tästä syystä aiheutuneet virheet saattoivat siirtää routarajaa todellista syvemmälle kovien pakkasten aikaan. Roudan sulaessa ulkoilman lämpötila oli lähellä kalibrointilämpötilaa eikä virhe ollut siten enää merkityksellinen.

Roudan sulaessa havaittiin, että maarakenteiden sulamislämpötila oli kaikissa kohteissa selvästi nollan alapuolella. Aluksi epäiltiin, että dataloggerit mittaavat lämpötilan liian kylmäksi. Lämpötila-antureiden kalibrointi tehtiin selvästi tarkemmalla mittalaitteella ennen asennusta. Kyseisellä laitteella tehdyn vertailumittauksen mukaan Karkun dataloggeri mittasi lämpötilan hieman väärin, mutta otaksumasta poiketen yläkanttiin. Mittausvirhe oli hieman kanavakohtainen ja se oli suuruudeltaan keskimäärin $1,0^{\circ}\text{C}$. Siten rakennekerrosten sulaminen tapahtui kohteesta riippuen jo $-2,5 \dots -1,6$ asteen lämpötilassa. Sulamislämpötila vaikutti alhaiselta, mutta kirjallisuuden mukaan mahdolliselta. Riippuen materiaalin ominaispinta-alasta, veden jäätyminen ja sulaminen tapahtuu vasta hieman nollan asteen alapuolella. Jatkossa lämpötila-antureiden kalibrointi on syytä tehdä kyseisiä antureita maastossa mittaavalla dataloggerilla. Siten vältetään kiusallisilta kalibrointivirheiltä.

Ratapenkereen sulamislämpötilaksi valittiin lämpötila, missä syvimmällä rakenteessa routaantuneessa kerroksessa sijainneen anturin aika-lämpötilakäyrä muutti selvästi kulmakerrointaan (kuva 3.8). Jään sulamiseen vaadittava suuri energiamäärä piti lämpötilan lähes vakiona kunnes jään muututtua vedeksi lämpötila alkoi nopeasti nousta. Vastaavasti lämpötila painui nopeasti selvästi miinukselle vasta sen jälkeen, kun routaantuvassa kerroksessa oleva vesi oli jäätynyt. Jäljempänä esitetyt roudan syvyydet on laskettu käyttäen aika-lämpötilakäyristä määritettyä lämpötilaa routarajana.

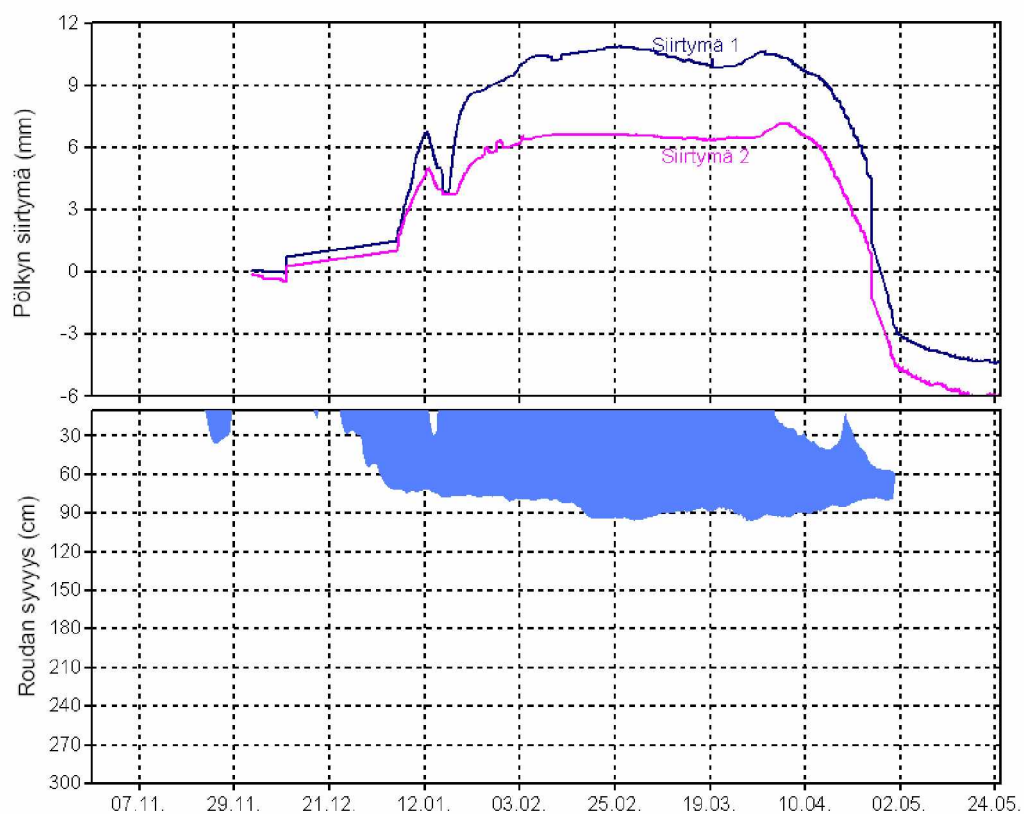


Kuva 3.8 Aika-lämpötilamittaustulokset eri syvyyksiltä Oikoradalta km 65+079. Lämpötilan muutosnopeus muuttuu selvästi, kun vesi jäätyy tai sulaa. Syvimmän selvästi routaantuneessa kerroksessa sijainneen anturin sulamislämpötilaa käytettiin routarajan määritelmänä.

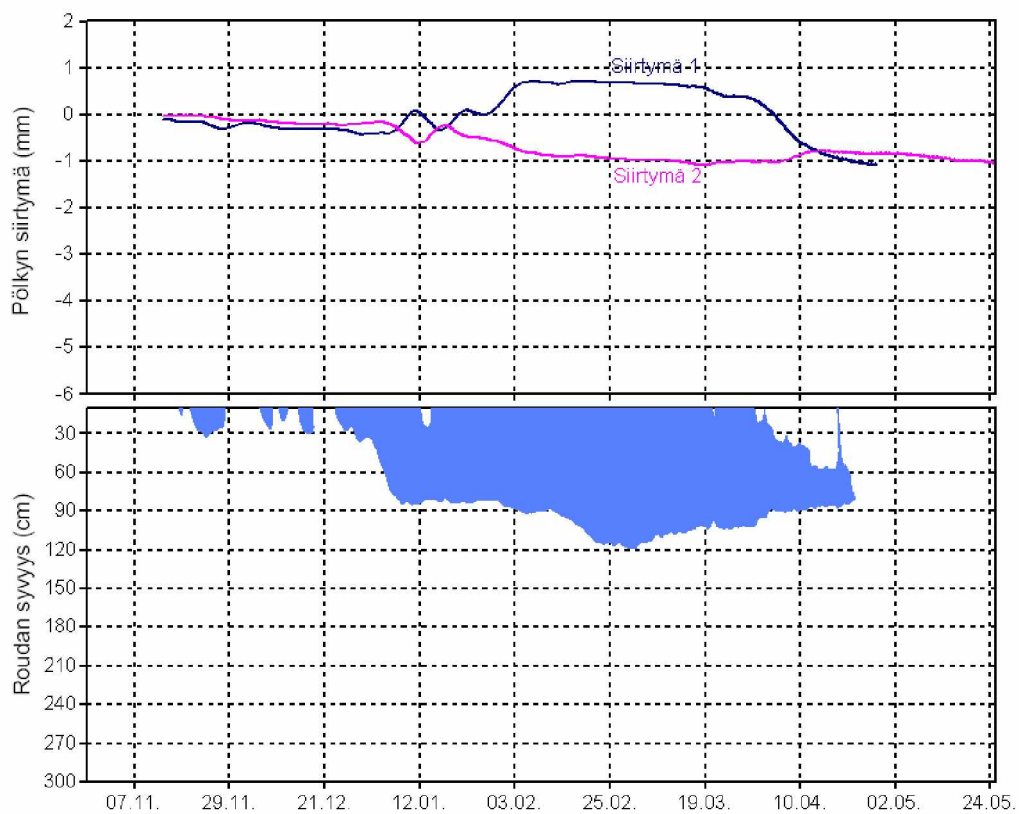
Edellä esitetyissä mittaustuloksissa (kuva 3.8) oli mielenkiintoinen havainto parin syvimmällä sijaitsevan lämpötila-anturin osalta. Lämpötilan noustua nollan yläpuolelle penkereen pinnalla, alkoi voimakas jäähtyminen syvällä rakenteessa. Todennäköisin selitys ilmiölle on sulamisvesien aiheuttama jäähtyminen. Nolla-asteinen sulamisvesi on kulkeutunut ilmeisesti rakenteeseen penkereen läpi tai sivulta ja jäähdyttänyt rakennetta. Vastaavaa ilmiötä ei kuitenkaan havaittu muualla kuin Oikoradan koekohteessa, jossa pengermateriaali on selvästi muita havaintokohteita läpäisevämpää.

3.6 Routahavainnot

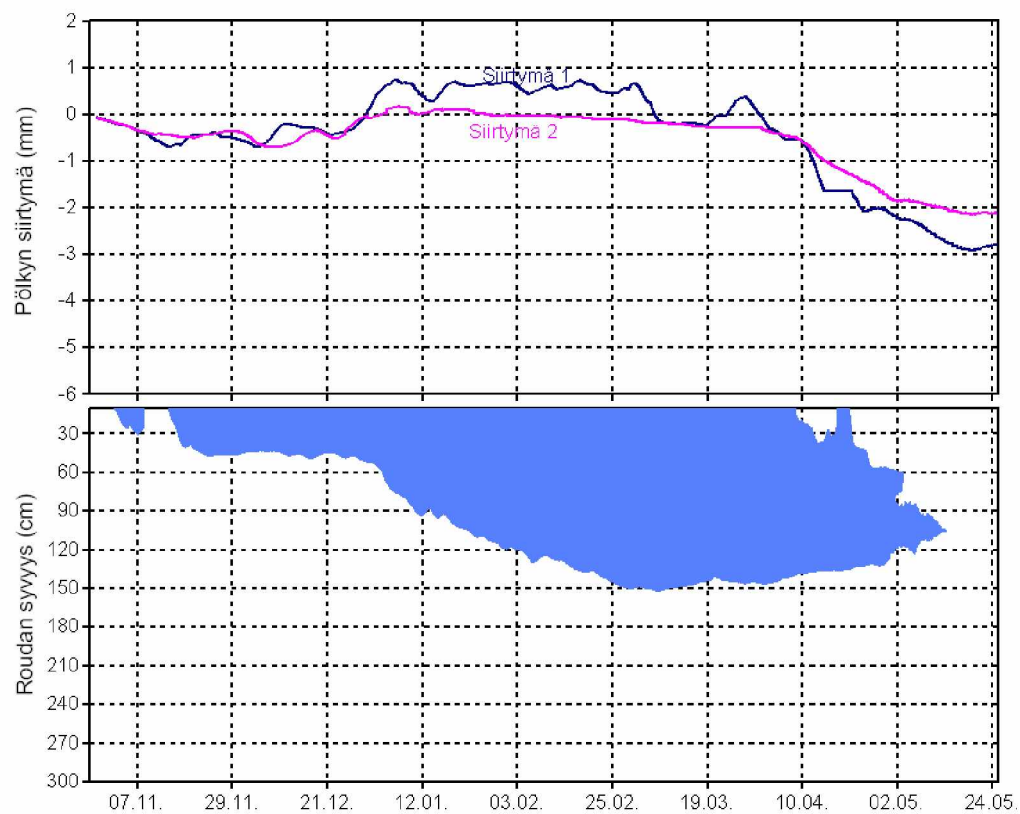
Seuraavaan on koottu talven 2008–2009 aikana tehtyjen mittausten roudansyvyys- ja routimishavainnot (kuvat 3.9–3.14). Tulosteissa ylemmässä kuvassa on esitetty ratapölkyn päistä tehtyjen routanousuhavaintojen tulokset ja alemmassa kuvassa lämpötilan perusteella arvioitu routaantumisyyvyys ajan suhteen. Selvää routimista havaittiin oikeastaan vain Pääradan koekohteessa Viialassa. Siellä routanousu oli 7–10 mm siten, että kaksoisraiteen ulkoreuna routi hieman keskiosaa enemmän. Muissa neljässä kohteessa routimista oli selvästi vähemmän. Kaikissa kohteissa tehtiin siinä määrin havaintoja ratapölkyn liikkeestä, että instrumentoinnin toimivuuden suhteen ei syntynyt epävarmuutta. Kaikissa kohteissa yhteisenä tekijänä oli ominaisuus, että roudan sulamisen jälkeen instrumentoitu ratapölkky jäi selvästi alempaan asemaan, kuin missä se oli ollut ennen routaantumista. Tähän lienee syynä normaali raiteen dynaaminen toiminta, minkä vaikutuksesta raide vajoaa ajan kuluessa. Useimmissa kohteissa havaittu, mutta suuruudeltaan varsin pieni, routanousu aiheutui pohjamaan routimisesta. Ainoastaan Limingassa ja ehkä myös Karkussa routiminen tapahtui ainakin osin väli- tai eristyskerroksessa.



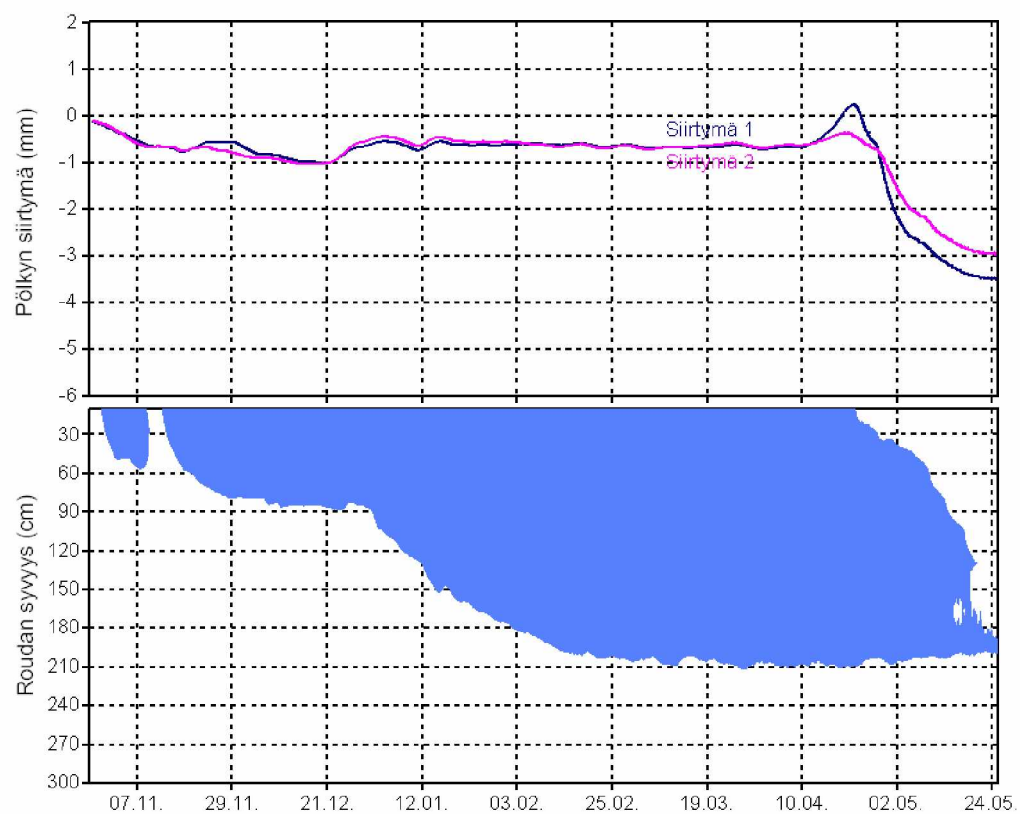
Kuva 3.9 Routanousu ja roudan syvyys Viialassa km 156+287.



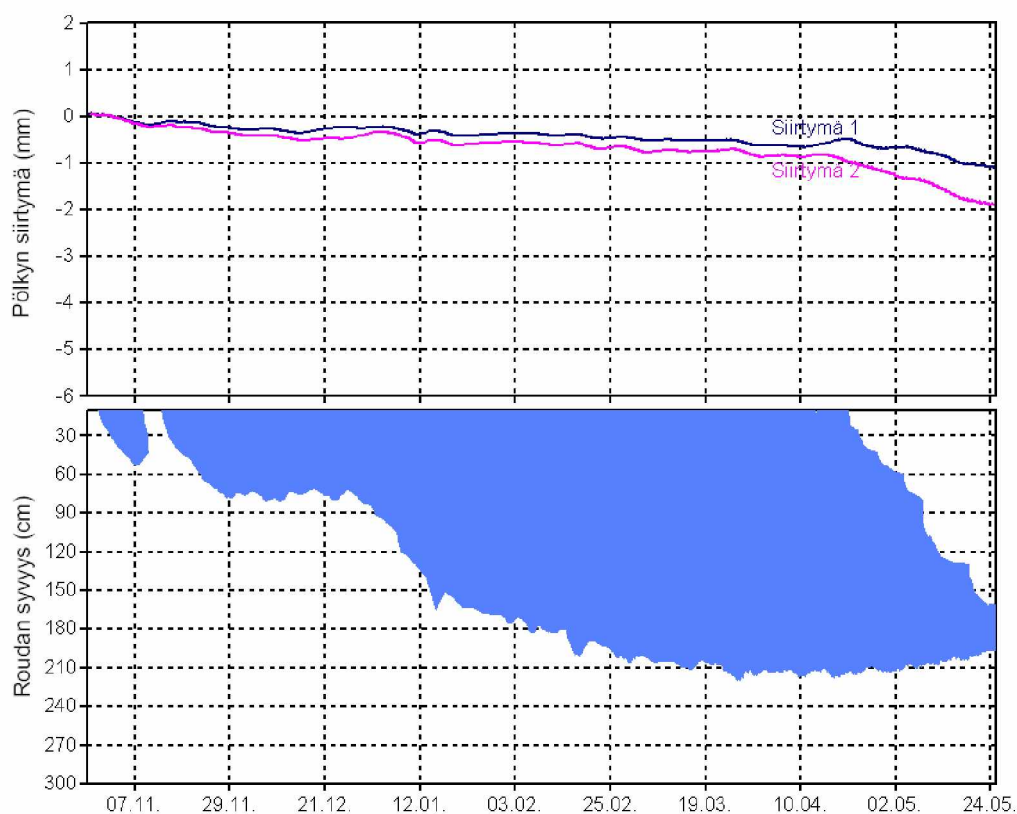
Kuva 3.10 Routanousu ja roudan syvyys Karkussa km 225+266.



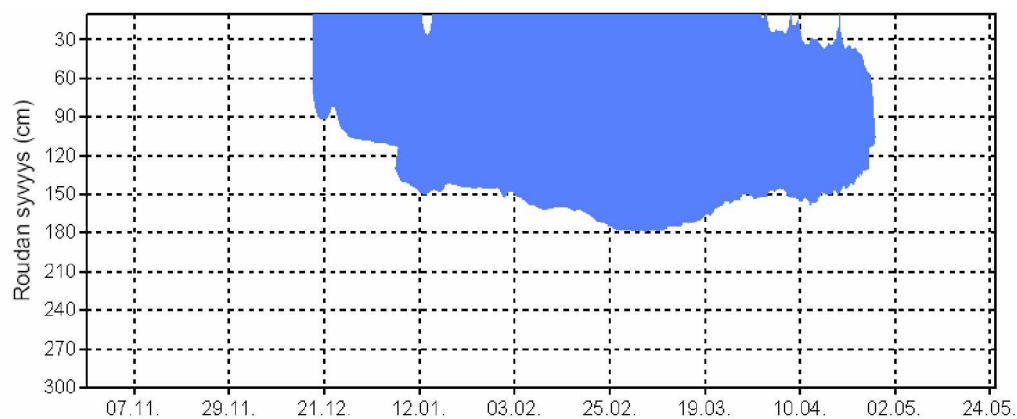
Kuva 3.11 Routanousu ja roudan syvyys Limingassa km 732+527.



Kuva 3.12 Routanousu ja roudan syvyys Torniossa km 899+498.



Kuva 3.13 Routanousu ja roudan syvyys Torniossa km 909+600.



Kuva 3.14 Roudan syvyys Oikoradalla Mäntsälässä km 65+079.

Edellä esitetyt roudan syvyys oli määritetty aika-lämpötilakäyrien kulmamuutoksen perusteella. Käytetty sulamislämpötila vaihteli kohteittain. Roudansyvyyden arviointiin käytetty sulamislämpötilat on esitetty taulukossa 3.2. Lämpötila on määritetty dataloggerien ilmoittaman lämpötilan perusteella eikä mahdollista dataloggerin mittaustuloksista ole otettu huomioon. Jos routaraja olisi määritetty nollan asteen perusteella, olisivat roudansyvyydet olleet keskimäärin noin 20 % suuremmat. Talven pakkasmäärät eri kohteissa on laskettu ulkoilman lämpötila-anturin mittaustuloksen perusteella korjaamatta mahdollisia dataloggerin mittaustuloksista. Taulukossa 3.2 esitetyt pakkasmäärät ovat siten mahdollisesti hieman alakanttiin arvioituja, mutta keskenään vertailukelpoisia. Oikoradan koekohteen pakkasmäärästä saattaa puuttua parisataa astetuntia, sillä ulkoilman lämpötila oli jo selvästi nollan alapuolella instrumentointia tehtäessä. Mittaustuloksissa huomionarvoista on se, että Oikoradalta

mitattu roudan syvyys on selvästi vastaavissa oloissa sijaitsevista kohteista (Viiala ja Karkku) mitattua suurempi. Ero aiheutuu selvästi harvemmasta ja kuivemmasta murskatusta kiviaineksesta rakennetusta rakenteesta.

Taulukko 3.2 Routaseurantakohteiden pakkasmäärät, sulamislämpötilat ja roudansyvyys sulamisen alkaessa.

Routaseurantakohteet			Roudan syvyyden arviointiin käytetty sulamislämpötila	Arvioitu roudan syvyys sulamisen alkaessa
Rataosa	Rata-km	Pakkasmäärä (Kh)	(°C)	(m)
Viiala-Mattila	156+287	11000	-0,7	0,8
Karkku-Suoniemi	225+266	12200	-0,6	1,1
Kempele-Liminka	732+527	22000	-1,5	1,4
Tornio-Niemenpää	899+498	27800	-0,9	2,0
Tornio-Niemenpää	909+600	28200	-1,2	2,0
Mäntsälä-Sipilä	65+079	12200	-0,6	1,5

4 Radan rakenteen monitorointi

4.1 Mittaustarpeen kuvaus

Betoniratapölkkytutkimuksissa on havaittu tarve kenttämittauksille koskien ratapölkyn kohtaamien rasitusten ja kestojen tarkasteluja (Nurmikolu 2007). Arvioitaessa tukikerroksen ja muun radan rakenteen kunnon vaikutusta betoniratapölkyn kohtaamiin rasituksiin mittauksia tulee tehdä useilla erityyppisillä ratapenkereillä. Tällaisten mittausten järjestäminen edellyttää, että monitorointitekniikka on teknisen toimivuuden lisäksi kustannuksiltaan kohtuullinen ja että järjestelmän toiminta on pitkälle automatisoitua. Kustannusten minimoimiseksi instrumentointi tulee olla mahdollista tehdä jälkiasenteisena. Työn tavoitteena on tällaisen monitorointijärjestelmän kehittäminen. Samassa yhteydessä tarkastellaan muita nopean mittauksen mahdollistavia jälkiasenteisia radan rakenteen tarkasteluihin soveltuvia mittaustekniikoita ja niiden soveltuvuutta kehitettävän monitorointijärjestelyn osaksi. Työssä myös selvitetään haastattelujen avulla muita esille tulleita rataa liittyviä monitorointitarpeita.

Liikennekuormituksen vaikutusta betoniratapölkkyjen käyttöikään voitaneen arvioida ratapölkyn taipuman ja kuormituskertojen perusteella. Mitä pienempiä ovat ratapölkyn muodonmuutokset sitä kauemman ja useamman ylityksen ratapölkky kestää. Ratapölkyn muodonmuutoksista mittausteknisesti helpoin ja luultavasti myös kustannustehokkain tapa on mitata ratapölkyn taipuman aiheuttamaa ratapölkyn yläpinnan muodonmuutosta. Riippuen ratapölkyn tuennasta muodonmuutos on joko kokoonpuristumaa tai venymää. Tuennalla pyritään siihen, että ratapölkky ei kohtaisi kovin suuria muodonmuutoksia. Ajan kuluessa junaliikenne tiivistää tukikerrosta ratapölkyn alta ja syrjäyttää kiviainesta helpoimpaan suuntaan eli raiteen sivulle. Jo pian tuennan jälkeen syntyy tilanne, missä ratapölkyn päät liikkuvat ratapölkyn keskiosaa enemmän. Näin ollen pölkyn yläpinnasta mitattava muodonmuutos on venymää.

4.2 Mittauslaitteiden rakentaminen ja kehitys

4.2.1 Betoniratapölkyn yläpinnan venymän mittaus

Ratapölkyn yläpinnan muodonmuutosta voidaan mitata venymä-anturien avulla. Venymäanturit koostuvat venymäliuskoista, jotka mittaavat yleensä teräksen muodonmuutosta. Venymäliuskoissa on vastuksia, jotka muuttavat ominaisuuksiaan lineaarisesti venymän suhteen. Neljän venymäliuskan avulla voidaan kompensoida lämpölaajeneminen, sillä osa liuskoista venyy ja osa kutistuu lämpötilan vaikutuksesta. Venymäliuska voidaan myös kiinnittää suoraan betoniin laboratorio-oloissa, mutta kentällä tehty kiinnitys ei ole pitkäikäinen. Liimaus maastossa ei onnistu betonin suuren kosteuspitoisuuden takia.

Kenttäkelpoisen anturin asennus tulee olla yksinkertainen ja luotettava. Useat kaupalliset anturit ovat joko hitsattavia tai betonin sisälle valmistusvaiheessa asennettavia. Jälkiasenteisen anturin ainoa käyttökelpoinen kiinnitystapa on ruuvikiinnitys. Ruuvikiinnitys mahdollistaa anturin vaihdon kätevästi, jos anturi vikaantuu. Ruuvikiinnitys on nopea toteuttaa ja se voidaan tehdä tarvittaessa jaksoittain junaliiken-

teen ehdoilla. Ruuvikiinnitystä varten ratapölkkyyn tehdään kaksi reikää iskuporakoneella. Reikiin lyödään kiila-ankkurit, joissa on sisäpuoliset kiertet ruuveja varten. Anturi kiinnitetään reikiin kahdella ruuvilla.

Kaupalliset ruuvikiinnitteiset anturit maksavat noin 500 - 1000 €/kpl. Venymäantureita voidaan valmistaa kohtalaisen helposti myös itse. TTY:llä on ajan kuluessa kehittynyt venymäanturimalli, joka on todettu hyväksi ja käyttökelpoiseksi anturiksi useisiin erilaisiin sovelluksiin. Alun perin anturi on kehitetty ratarumpitutkimuksia varten. Anturin mekaanista muotoa on parannettu tämän jälkeen pariin otteeseen. Lopputuloksena on syntynyt anturi, joka on passiivinen taivutukselle, mutta reagoi hyvin herkästi venymään (kuva 4.1). Anturirunko on valmistettu haponkestävästä teräksestä. Materiaalivalinnalla on pyritty varmistamaan anturin pitkäikäisyys. Anturin suojaus ja johtimen kiinnitys on kehitetyssä anturissa kaupallisia antureita vaatimattomampi. Esimerkiksi vesisuojausta ei ole lainkaan. Avonainen rakenne mahdollistaa anturin kastumisen, mutta myös sen kuivumisen. Keskimäärin avonainen anturi on siten kuivemmissa oloissa kuin puutteellisesti suojattu kaupallinen anturi. Mekaaninen suojaus tehtiin asennuksen jälkeen asentamalla kumimatto anturin päälle. Johtimen pituus on vapaasti valittavissa eikä johtimia tarvitse jälkeinpäin jatkaa kuten kaupallisten antureiden kanssa usein joudutaan tekemään. Itse rakennetun anturin materiaalikusannukset ovat muutamia satoja euroja. Työkustannusten ja kalibrointien jälkeen anturi ei ole välttämättä kaupallisia antureita halvempi, mutta tekniseltä toimivuudeltaan se on arvioitu paremmaksi.

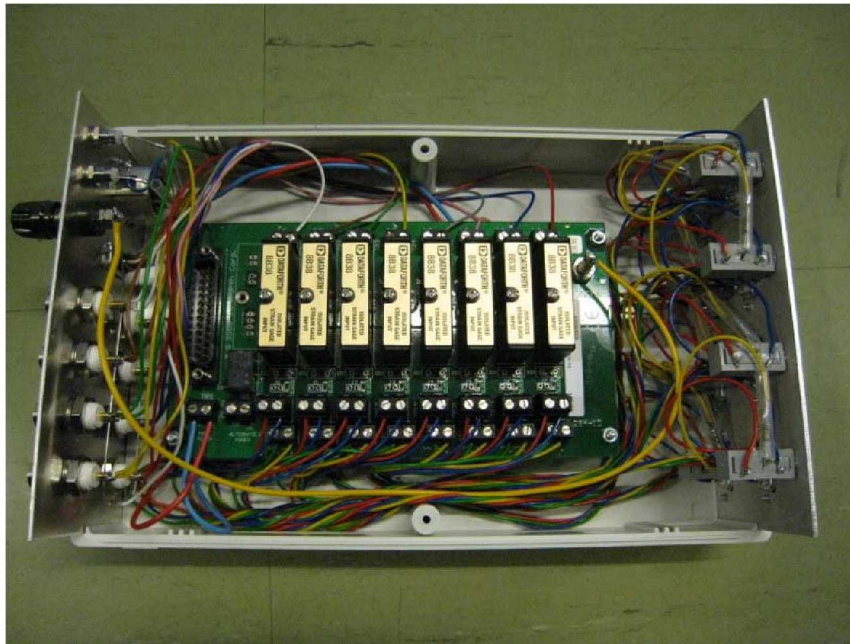


Kuva 4.1 Ratapölkyn taipuman mittaamiseen tarkoitettu venymäanturi suojaa-mattomana ja suojattuna. Kiinnitys ratapölkkyyn tehdään kahden ruuvin avulla. Anturi voidaan helposti poistaa tai vaihtaa. Kuminen suojamatto kiinnitetään ratapölkkyyn lyötävillä ruuviankkureilla.

4.2.2 Venymäliuskahvistin

Riippumatta siitä kenen valmistamaa venymäliuskatomista anturia käytetään, merkittävän osan mittalaitejärjestelystä muodostaa mittaamiseen tarvittava vahvistin. Vahvistin tarvitaan muuttamaan anturilta tuleva millivoltin suuruusluokassa oleva jännite helpommin mitattavaksi volttiluokan jännitteeksi. Vahvistimia on ominaisuuksiltaan erilaisia. Kun mitataan pitkäaikaisia mittauksia, jossa mittaussuureet muuttuvat hitaasti, tarvitaan mahdollisimman stabiili vahvistin, jonka ominaisuudet pysyvät vakaina. Junakuorman aiheuttamat rasitukset ovat luonteeltaan dynaamisia eli nopeasti tapahtuvia. Dynaamisissa mittauksissa voidaan käyttää epästabiilimpaa ja samalla huokeampaa vahvistinta, etenkin jos pitkäaikaiset muodonmuutokset eivät ole kiinnostavia. Nopeissa mittauksissa vahvistimelta vaaditaan riittävän suurta taajuusvastetta. Lähes kaikki nykyiset vahvistimet täyttävät tämän ehdon.

Vahvistin voidaan hankkia dataloggeriin integroituna tai käyttää erillistä vahvistinta. Paras ratkaisu on hankkia venymäliuskojen dynaamiseen mittaamiseen tarkoitettu dataloggeri. Niiden hinnat alkavat noin 5000 eurosta. Selvästi huokeampi tapa on valmistaa erillinen vahvistin kaupallisista moduuleista ja käyttää mittaamiseen yksinkertaisempaa dataloggeria. Kanavakohtaisia vahvistimia saa halvimmillaan noin 100 eurolla. Esimerkiksi 8 anturin dynaamisiin mittauksiin tarkoitettu vahvistin voidaan rakentaa kaupallisista osista noin 1000 eurolla. Lisäksi tarvitaan noin 600 euron hintainen mittakortti tai dataloggeri, jonka avulla vahvistettu signaali digitoidaan. Laitehankinnat jäävät siten noin kolmasosaan varsinaiseen venymäliuskadataloggeriin verrattuna. Tässä tutkimuksessa päädyttiin rakentamaan vahvistin Dataforthin 8B38 moduuleista ja mittakorttina toimi Advantechin USB-4716 dataloggeri (kuva 4.2).

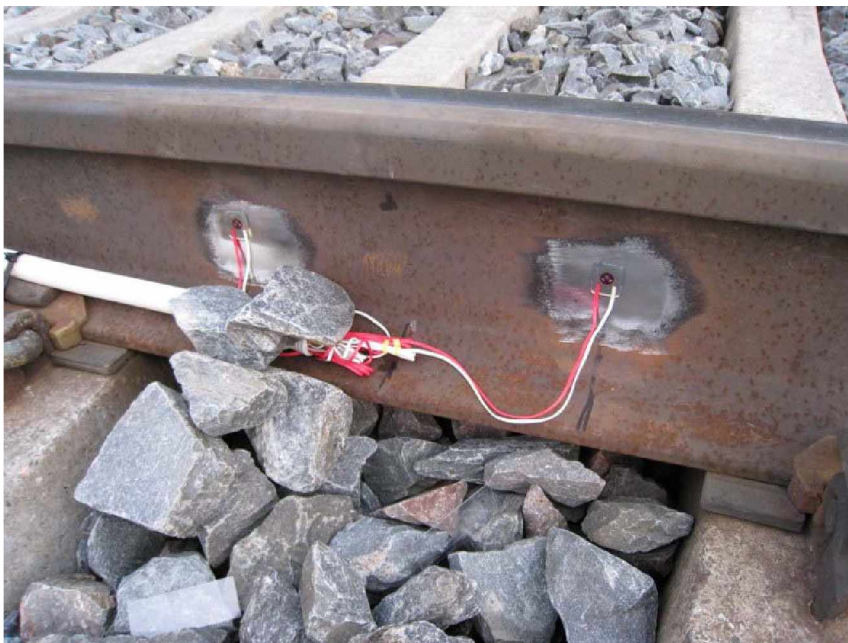


Kuva 4.2 Dataforthin tuotteista valmistettu venymäliuskavahvistin ja dataloggerina käytetty Advantechin USB-loggeri.

4.2.3 Akselipainon mittaus

Rataympäristössä tehtävät mittaukset edellyttävät lähes poikkeuksetta tietoa akselipainosta. Akselipainon mittaustiedon avulla eri mittaustuloksia voidaan verrata helposti keskenään. Akselipainon mittaaminen ei ole teknisesti erityisen haastava tehtävä, mutta se vaatii hieman erityisosaamista. Valmiita kaupallisia konsepteja akselipainon mittaamiseksi ei ole saatavilla kohtuullisin kustannuksin.

Junan akselipainojen mittaus voidaan tehdä kiskoon liimattavien venymäliuskojen avulla. Venymäliuskat liimataan noin 250 mm etäisyydelle toisistaan kiskon uumaan (kuva 4.3.). Instrumentointi mittaa tarkalleen ottaen kiskon leikkausmuodonmuutosta. Leikkausmuodonmuutoksen suuruus ei muutu tuentapisteiden etäisyyden suhteen kuten kiskon taivutus muuttuu. Menetelmän avulla voidaan periaatteessa instrumentoida mikä tahansa pölkkyväli ilman että tarvitaan erillistä kalibrointia. Venymäliuskat liimataan kiskoon 45 asteen kulmaan. Kulmapoikkeamat aiheuttavat virhettä ja siksi tarkkoja mittauksia varten instrumentointi tulee kalibroida.



Kuva 4.3 Junien akselipainojen mittaamiseen tarkoitetut venymäliuskat liimattuna kiskon uumaan. Ennen asennusta kisko hiotaan huolellisesti ja puhdistetaan asetonilla. Asennuksen jälkeen hiottu kohta peitetään liimamassalla, jotta ruosteen eteneminen venymäliuskan ja teräksen väliin hidastuu.

Suoralla rataosalla likimääräinen kalibrointi voidaan tehdä junien avulla, sillä veturi- en staattiset akselipainot ovat varsin yhtenevät noin 200 - 210 kN. Ainoastaan Pendolinon akselit ovat selvästi kevyempiä (noin 140 kN). Pendolino voidaan erottaa akselirakenteensa perusteella helposti mittaustiedosta. Kaarteissa sijaitsevan instrumentoinnin kalibrointi junien avulla on hankalampaa. Raiteen kallistuksen takia kiskokohtaiset pyöräpainot vaihtelevat ajonopeuden mukaan. Molemmista kiskoista mitattu yhteenlaskettu akselipaino ei muutu, mutta kiskokohtaisten kalibrointikertoimien laskeminen vaatii useiden junien mittauksia, nopeuden määrittämistä ja hieman iterointia. Yksiselitteinen tapa kiskovoimien kalibrointiin on käyttää erillistä kalibrointilaitteistoa. Laitteisto koostuu palkista, joka asennetaan kiskon yläpuolelle tukien varaan. Kiskon kuormitus tehdään palkkia vasten hydraulisella tunkilla, johon on kiin-

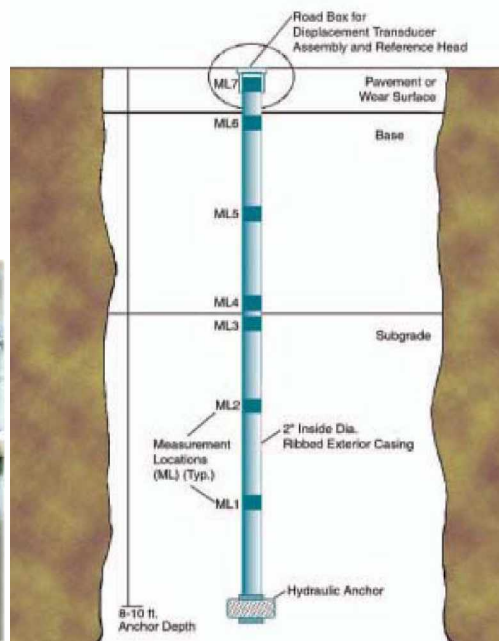
nitetty erillinen voima-anturi. Laitteiston käyttö tarvitsee vähintään kaksi henkilöä ja noin 20 minuuttia pitkän raiteen varauksen yhden kiskon kalibrointia varten.

Kiskovoimien mittaamiseen käytettävät venymäliuskat vaativat samanlaisen vahvistimen kuin ratapölkyn venymäanturit. Kiskovoimien mittauksessa tarvitaan suurta näytteenottotaajuutta (2000 Hz). Nopeimmat junat liikkuvat 200 km/h nopeudella. Koska venymäliuskat sijaitsevat 250 mm etäisyydellä toisistaan, nopea juna kulkee kyseisen matkan 4,5 millisekunnissa. Kahden kilohertsin mittaustaajuudella signaaliin saadaan ylityksestä 9 näytettä, mikä on välttävä määrä suurimman akselipainon määrittämiseksi. Hitaammin liikkuvista junista saadaan selvästi enemmän dataa ja mittaustulosten tulkinta on siinä suhteessa helpompaa.

4.2.4 Penkereen kerroksittaiset muodonmuutokset

Penkereiden dynaamisia muodonmuutoksia on mitattu Suomessakin useissa kohteissa niin rata-, tie- kuin laboratoriomittakaavassa. Yleensä mittauksissa on keskitytty dynaamiseen osaan muodonmuutoksista. Antureina mittauksissa on käytetty erilaisia kaupallisia venymäantureita ja usein myös niiden paranneltuja omavalmisteisia versioita. Anturit on asennettu penkereen sisään rakentamisen yhteydessä. Asennus vie yleensä paljon aikaa ja soveltuu siten huonosti rataympäristöön.

Jälkiasenteisia penkereen pystysuuntaisen muodonmuutoksen mittaamiseen tarkoitettuja mittaustaitteita myydään kaupallisena versiona ainakin kahta mallia. Nämä ovat Dynatestin Multi-Depth Deflectometer (MDD) ja CTL Groupin Snap Multi-Depth Deflectometer (SnapMDD). Molempien toimintaperiaate on lähes vastaava, Rakenteeseen porattuun reikään asennetaan mittaustanko ja tankoon määrävälein LVDT – tyyppisiä (Linear Variable Displacement Transducer) antureita. Tangon ankkurointi ja antureiden kiinnitysmenetelmät eroavat hieman toisistaan. MDD:ssä anturit kiinnitetään porareian reunoihin teräskuulien avulla. Porareikä on tätä ennen päällystetty kumimaisella materiaalilla. Menetelmän etuna on, että laitteet voidaan poistaa porareistä käytön jälkeen. SnapMDD kiinnitetään liimamassan avulla. Molemmat versiot voidaan asentaa ainoastaan pohjavedenpinnan yläpuolelle. Rajoitteena ovat asennusteknisten syiden lisäksi anturit, jotka eivät ole vesitiiviitä. Mittaustangon ankkurointi on hoidettu MDD:ssä mekaanisella tartunnalla, SnapMDD on toteuttanut ankkuroinnin hydraulisesti laajenevalla ankkurilla (kuva 4.4).



Kuva 4.4 Kaksi erilaista MDD-laitetta. Vasemmalla Dynatestin versio ja oikealla periaatekuva CTL Groupin versiosta.

Sähköpostikeskusteluissa molempien laitteiden markkinoijien kanssa ilmeni, että kumpaakaan laitetta ei ole mahdollista asentaa parin tunnin työraossa. Toisen valmistajan edustaja kertoi, että pelkkä asennusreiän poraaminen vie yleensä yhden työvuoron. Molempien laitteiden asennus kestää yleensä kaksi työpäivää. Tämän tiedon perusteella kumpaakaan laitetta ei ole mahdollista käyttää rataympäristössä vaikka ne pinnalta asennettavia ovatkin. Saatujen tietojen perusteella yritettiin kehittää nopeammin asennettavissa oleva versio vastaavalla periaatteella toimivasta mittalaitteesta.

Laboratoriossa tapahtunutta tuotekehitystä varten hankittiin kaksi siirtymäanturia. Ne olivat ulkomuodoltaan vastaavia kuin kaupallisissa MDD-laitteissa, mutta tiiveysluokituksestaan vesitiiviitä. Anturit asennettiin joustavan muoviputken sisälle 400 mm etäisyydelle toisistaan ja kiinnitettiin suojaputkeen liimamassalla. Anturielementti asennettiin tuolloin meneillään olleeseen pengerleveystutkimuksen koepenkereeseen. Asennus tehtiin penkereeseen kairattuun reikään. Reikä kairattiin käsin kierrekairalla. Mittaustanko asennettiin reikään ja tangon alaosa kiinnitettiin hiekkaan reiän pohjalle pudotetun laastin avulla. Muovinen suojaputki kiinnitettiin penkereeseen kuivan asennushiekan avulla. Asennushiekka tiivistettiin porakoneella pyöritetyn epäkeskon tangon avulla täryttäen. Ensimmäisessä testissä anturielementti asennettiin kuorman viereen lähelle penkereen päätä. Tunkeilla aiheutettu penkereen muodonmuutos oli mittaustuloksen mukaan varsin vähäinen. Aluksi oletettiin, että hiekka-asennus ei välitä muodonmuutosta kunnolla antureille. Asian varmistamiseksi asennus toistettiin ja anturielementti sijoitettiin suoraan tunkin alle. Muodonmuutokset olivat tässä tapauksessa selvästi suurempia ja vastaavia muihin penkereeseen sijoitettuihin antureihin verrattuna. Hiekan avulla asennettava monikerroksinen mittalaite katsottiin olevan mahdollista asentaa melko lyhyessäkin työraossa.

Varsinainen maastoon tarkoitettu mittalaite sisälsi viisi siirtymäanturia. Anturit sijoitettiin 0,5 metrin välein ja mittatanko oli 3 metriä pitkä. Ensimmäinen mittaussväli alhaalta lukien oli 1 m ja muut 0,5 m. Anturiksi valittiin vesitiivis malli. LVDT-anturit tarvitsevat tasavirralla tapahtuvaa mittausta varten elektroniikkaa, joka on mahdollis-

ta sijoittaa anturin yhteyteen tai erilliseen vahvistimeen. Kenttäasennuksia varten valittiin jälkimmäinen vaihtoehto. Elektroniikattomat anturit olivat selvästi halvempia. Vahvistinta voitaneen käyttää myöhemmin uudelleen vaikkapa toisessa koekohteessa. Maahan asennettuja antureita ei todennäköisesti voida poistaa ehjänä muuten kuin kaivamalla mikä ei liene kyseisessä asennuskohteessa mahdollista.

Antureina käytettiin Solartronin S-sarjan antureita. Antureiksi valittiin mittausalueltaan kahta eri mallia. Kahden ylimmäisen anturin mittausalue oli 50 mm ja kolmen syvemmälle sijoitetun anturin 30 mm. Vaikka antureiden mittausalueet olivat melko suuria dynaamisiin muodonmuutoksiin nähden, oli olettavaa, että antureiden asentaminen mittausalueelle saattaa koitua ongelmalliseksi. Mittausalueella pysyminen pyrittiin varmistamaan asennuksen aikaisella tukiraudalla, joka kiinnitettiin anturien suojaputkeen keraamisella metallilla (kuva 4.5). Keraaminen metalli kiinnittyy teräkseen hyvin, mutta liukkaaseen muovin huonosti. Keraaminen metalli tarraa kuitenkin lujasti muoviputken poimuihin. Terästanko pitää antureiden keskinäiset etäisyydet oikealla jaolla asennuksen ajan. Terästanko poistetaan hiekka-asennuksen jälkeen terästankoa pyöräyttämällä.

Anturitangon ankkuriksi valittiin mekaaninen malli, missä tankoon hitsattiin muutamia pyöreitä teräslevyjä. Asennushiekan oletettiin tiivistyvän tärinän vaikutuksesta asennusreikään ja muodostavan riittävän tartunnan. Laasti- tai betoniasennuksesta luovuttiin, koska sen tekeminen laboratorio-oloissakin vei jonkin verran aikaa. Tässä vaiheessa asennuskohteeksi oli jo valittu Päärata Viialassa. Alustavan tiedon mukaan päivän aikana oli käytettävissä vain muutamia noin 20 minuutin työrajoja eikä betonin kanssa tehtävää asennusta katsottu toteuttamiskelpoiseksi.



Kuva 4.5 Ratapenkereen kerroksittainen muodonmuutoksen mittausanturi.

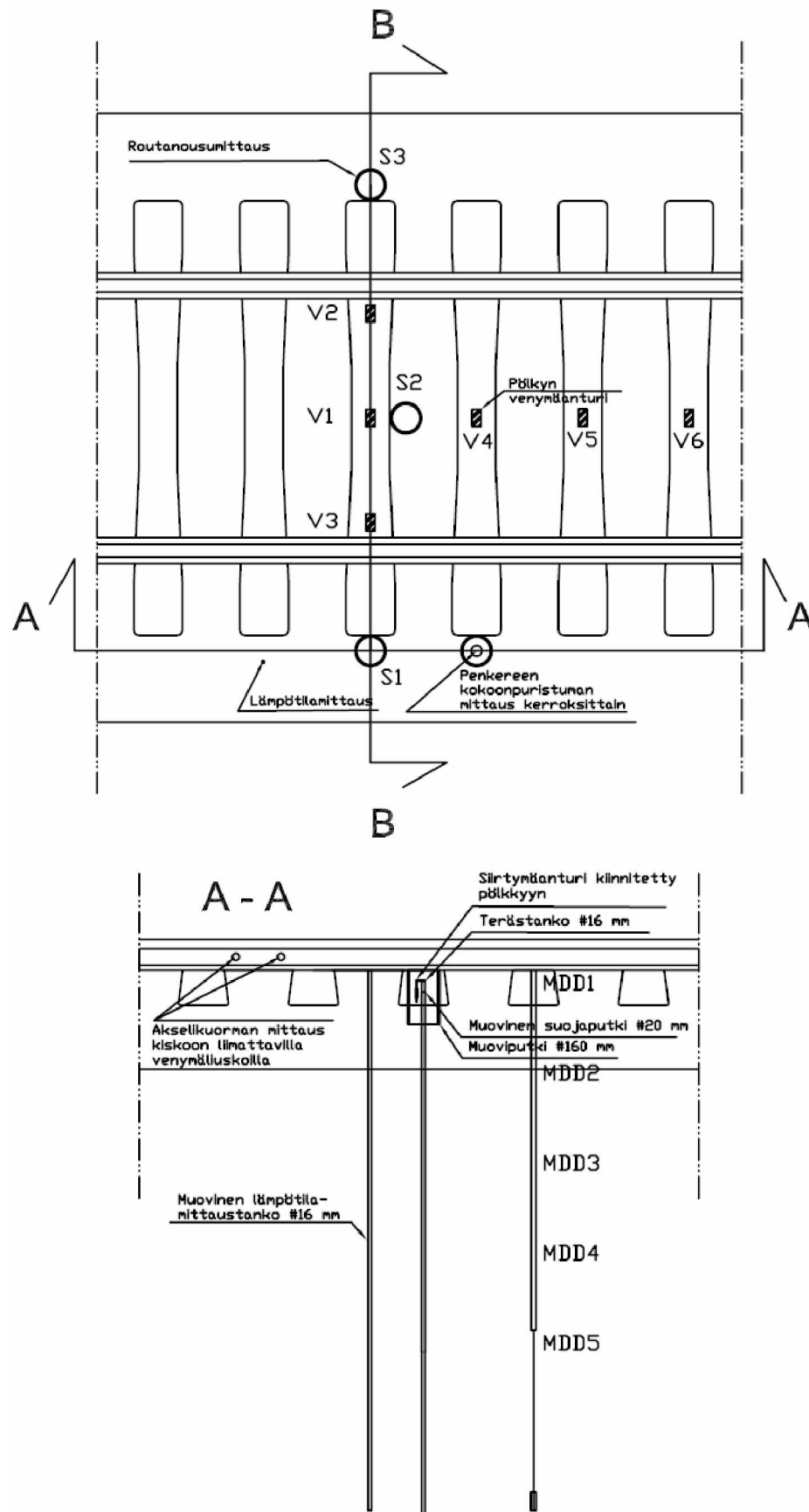
4.3 Viialan koekohde

4.3.1 Koekohteen esittely

Viialan routaseurantakohteen km 156+286 yhteyteen rakennettiin routamittausten lisäksi ratapölkkyjen taivutuksen mittaamiseen ja radan rakenteen kerroksittaisen pystysuuntaisen muodonmuutoksen mittaamiseen tarkoitetut mittausjärjestelyt. Kohteen sijoittelulla haettiin suurta liikennemäärää. Viialassa sijaitsee yksi pääradan harvoista, aika-ajoin epätasaisti routivista kohteista. Kohde sijaitsee Hinkan oikaisun pohjoispäässä, kohdassa missä oikaisu erkanee vanhasta ratalinjasta. Suunnitelmien mukaan rakennekerrospaksuus on kyseisessä kohdassa vain 0,8 metriä. Raide sijaitsee matalassa leikkauksessa. Ympäröivä maasto viettää radan vasemmalla puolella olevan huoltotien jälkeen voimakkaasti alaspäin. Kunnollisia ojia kuivatuksen varmistamiseksi ei ole olemassa. Routasuojaus on tehty routalevyllä, jonka paksuutta ei ole selvitetty. Routalevyn olemassaolo selvisi vasta instrumentointien yhteydessä. Samalla havaittiin myös korkealla oleva pohjaveden pinta. Tarkempia havaintoja varten kohteeseen asennettiin pohjavesiputki, joka luettiin manuaalisesti 2.12.2008. Pohjaveden pinta oli vain noin 1,2 metriä korkeusviivan alapuolella.

4.3.2 Instrumentoinnit

Pääradan koekohteeseen asennettiin kaikkiaan 16 dynaamiseen mittaukseen tarkoitettua anturia. Niitä olivat ratapölkyn venymäanturit 6 kpl, kiskovoiman mittaus 2 kpl, ratapölkyn siirtymämittaus 3 kpl sekä kerroksittaiset penkereen muodonmuutosanturit 5 kpl. Lisäksi asennettiin 12 lämpötila-anturia penkereeseen ja ulkoilman lämpötila-anturi. Anturit asennettiin kuvan 4.6 esittämällä tavalla.



Kuva 4.6

Viialan koekohteen instrumentointisuunnitelma. Koekohteeseen asennettiin kaikkiaan 16 dynaamiseen mittaukseen tarkoitettua anturia ja 13 lämpötila-anturia.

Instrumentoinnit aloitettiin routahavaintotankojen asennuksella. Muissa kohteissa tangot asennettiin käsin, mutta Pääradalla käytettiin myös kairavaunua. Työraot olivat niin lyhyitä, että tankojen asennuksen ei uskottu onnistuvan käsipelissä. Kairavaunu tilattiin Geopalvelu Oy:ltä. Kairavaunua varten tehtiin puusta telineet, jotta vaunu pystyi helposti liikkumaan raiteille ja pois raiteelta kaapelikourun yli. Viialan kohteessa routanousun havaintotangot tehtiin kairatangoista. Kairatangot asennettiin kovaan pohjaan saakka, joka sijaitsi noin 5 metrin syvyydessä. Kairatankoja käytettiin routanousun havainnoinnin lisäksi ratapölkyn taipuman mittaamiseen siirtymäantureilla. Kovaan pohjaan asti yltävä tanko asennettiin pölkyn molempien päiden ohella myös ratapölkyn keskelle.

Ratarakenteen kivisyyden takia kairavaunun kairausnopeus ei ollut odotusten mukainen. Asennus tehtiin iskemällä painokairan vasaralla. Ensimmäisen tangon asennukseen kului niin paljon aikaa, että toinen ja kolmas tanko asennettiin yhtäaikaaisesti eri menetelmillä. Yhtä tankoa asennettiin kairavaunulla ja toista poravaasaralla (kuva 4.7). Työsaavutus oli yllättäen molemmilla menetelmillä samankaltainen. Poravaasaralla tehty asennus oli jopa hieman nopeampi, sillä kairakärki auttoi kairan tunkeutumisessa. Kairavaunun asentamissa kairoissa ei käytetty kärkeä. Kairavaunulla saavutettu nopeus oli ennako-odotuksiin nähden varsin vaatimaton. Käsin tehtävässä asennuksessa on turvallisuuden kannalta paljon vähemmän riskejä, sillä miehistö on helposti poistettavissa radalta varauksen päättyessä.



Kuva 4.7 Routanousun ja ratapölkyn taipuman havaintotankojen asennus. Työn jouduttamiseksi käytettiin samanaikaisesti kahta eri menetelmää: yhtä tankoa asennettiin kairavaunulla ja toista poravaasaralla.

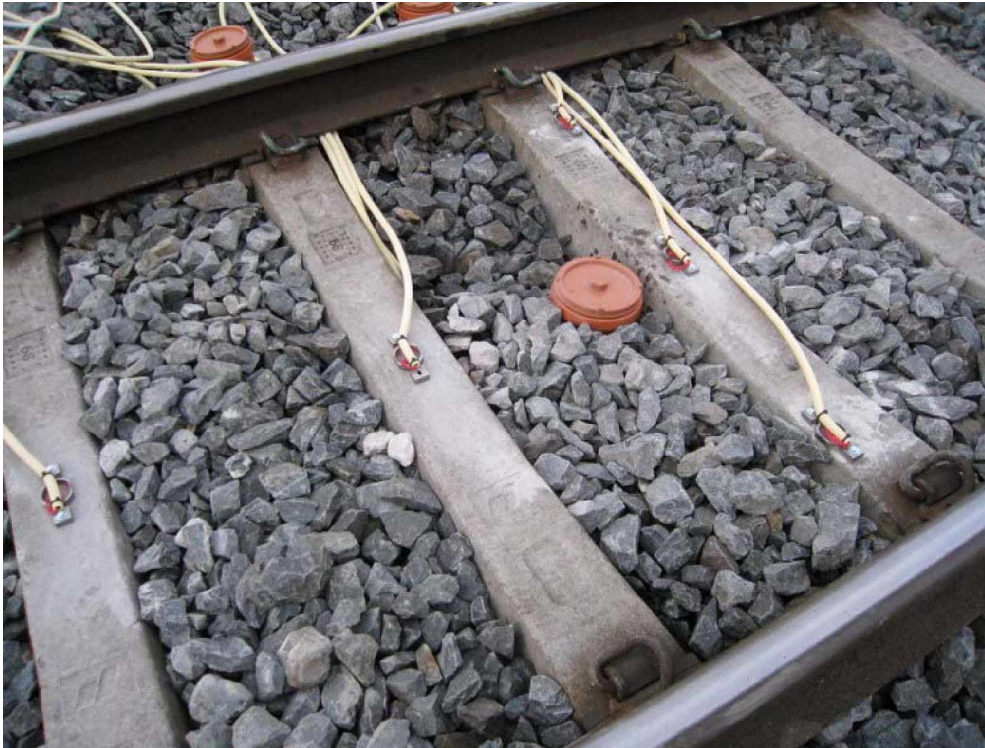
Kerroksittainen muodonmuutosanturi asennettiin ratapölkyn päähän vastaavaan paikkaan kuin routanousuhavaintotanko. Asennusta varten tehtiin 50 mm reikä kairaamalla. Kairauksessa käytettiin painokairoja, mutta kairausta varten oli tehty irrallinen avarrin. Avartimen avulla vietiin muovinen asennusputki sepelikerroksen läpi. Avarrin jäi lopulta asennusreiän pohjalle. Ensimmäinen 50 mm reikä onnistuttiin te-

kemään määräsyvyyteen saakka, mutta reikä liettyi tukkoon ennen kuin anturielementti ehdittiin asentamaan reikään. Pohjavesi oli hyvin korkealla ja se edisti kairareian tukkeutumista. Toisella yrittämällä asennusreikä säilyi avonaisena ja anturielementti saatiin määräsyvyyteen saakka. Asennusreikä täytettiin hiekkapuhallushiekalla (kuva 4.8). Hiekkatäytön jälkeen anturielementtiin liimattu terästanko kierrettiin irti ja vedettiin pois reiästä. Ylin anturi kiinnitettiin mekaanisesti ratapölkkyyn.



Kuva 4.8 Monikerroksisen muodonmuutosanturin asennus. Anturielementti asennettiin 50 mm kairareikään ja kiinnitettiin ympäristöönsä asennushiekan avulla.

Ratapölkyn venymäanturit asennettiin suunnitelman mukaisesti neljään peräkkäiseen ratapölkkyyn ratapölkyn keskelle. Lisäksi ensimmäiseen ratapölkkyyn asennettiin kaksi lisäanturia lähelle kiskon kiinnitystä. Näitä antureita ei voitu asentaa ratapölkyn keskilinjalle, koska ratapölkyn yläpinta oli epätasainen valmistusmerkintöjen takia. Venymäanturit asennettiin ratapölkyn reunaan, missä oli suora ja tasainen alusta (kuva 4.9).



Kuva 4.9 Ratapölkyn venymäantureiden asennus. Venymäanturi asennettiin neljään peräkkäiseen ratapölkkyyn keskelle yläpintaan. Lisäksi ensimmäiseen ratapölkkyyn asennettiin venymäanturit lähelle kiskon kiinnitystä.

Akselipainon mittaamiseen tarkoitetut venymäliuskat asennettiin ainoastaan toiseen kiskoon. Tarkan akselipainon mittaamiseksi venymäliuskat olisi pitänyt asentaa molempiin kiskoihin samaan pölkkyväliin. Näin ei kuitenkaan uskallettu tehdä junakulunvalvonnan takia. Vaikka venymäliuskat ovat galvanisesti erotettu kiskosta eli venymäliuska on vain muovin välityksellä kiinni kiskossa, on olemassa teoreettinen mahdollisuus, että kiskot kytkeytyvät instrumentoinnin välityksellä yhteen ajan kuluessa. Tämä tarkoittaisi häiriötä kulunvalvonnassa. Vikaantunut kohta olisi lisäksi äärimmäisen vaikea paikantaa. Pienintäkään riskiä junaliikenteen häiritsemiseksi ei haluttu ottaa. Venymäliuskat liimattiin tästä syystä samaan kiskoon peräkkäin. Tällä järjestelyllä pystyttiin mittaamaan junien ajonopeus hyvin tarkasti. Lyhytaikaisessa käytössä venymäliuskat voidaan huoletta kiinnittää molempiin kiskoihin ilman että tarvitsee miettiä kulunvalvonnan häiriintymisestä. Pitkän ajan kuluessa on mahdollista esimerkiksi, että johtimet kuluvat puhki ja aiheuttavat oikosulun kiskojen välille.

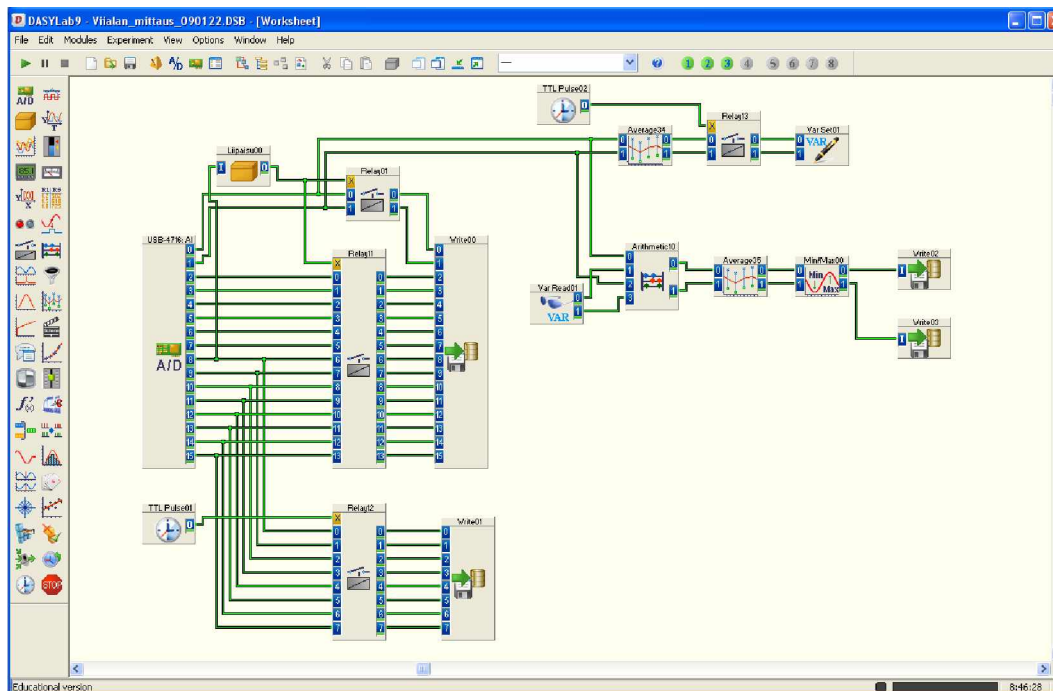
Kaikki käytetyt anturit olivat langallisia. Langattomat anturit soveltuvat huonosti maarakenteiden mittauksiin. Pitkäaikaisissa mittauksissa antureiden virransyöttö täytyy järjestää jollakin tavalla ja ainoa mahdollinen keino siihen ovat toistaiseksi johtimet. Mittaussignaalin lähettäminen langattomasti tiedonkeruuseen olisi osittain mahdollista. Koska tehon tarpeen takia tarvitaan johtimia joka tapauksessa, niin samalla mittaussignaalin kulkee kaapelia pitkin luotettavasti. Johtimien käytössä on myös haittansa. Esimerkiksi Viialassa raidesepelissä kulkee noin kymmenen suojaputkea ja jokaisessa on vähintään yksi signaalikaapeli (kuva 4.10). Aika näyttää kestävätkö kaapelit raiteen tuennan aiheuttamat rasitukset. Kaapelit pyrittiin sijoittamaan aivan ratapölkyn viereen, jotta tuentakoneen hakut eivät katkaisisi kaapeleita. On myös mahdollista, että kevyet kaapelit nousevat tuennan yhteydessä raidesepelin pintaan.



Kuva 4.10 Pääradan instrumentointi loppusuoralla. Raiteen vasemmalla puolella ja keskellä anturit ovat lopullisessa asemassaan ja suojattuna. Raiteen oikealla reunalla kaapeleiden asentaminen on vielä kesken. Raidesepelissä kulkee lukuisia suojaputkitettuja signaalikaapeleita.

4.3.3 Tiedon keruu, tallennus ja siirto

Dynaamisissa mittauksissa tarvitaan anturien, vahvistimien ja dataloggerin lisäksi tietokone ja mittausohjelma. Tietokoneena käytettiin aluksi sylimikroa, mutta teknisten ongelmien takia se vaihdettiin keväällä tavalliseen pöytäkoneeseen. Mittausohjelmistona käytettiin DasyLab-nimistä ohjelmistoa. DasyLab on ikonipohjainen ohjelmointikieli, jonka avulla voidaan tehdä helposti yksinkertaisia ohjelmia valmiiden työkalujen avulla. Ohjelmassa erilaiset työkalut yhdistetään toisiinsa vetämällä yhteys niiden välille. Yhteys kuvaa datan kulkua ohjelmassa. Kuvassa 4.11 on esitetty Viialan koekohteen mittausohjelman ulkoasu.



Kuva 4.11 Viialan koekohteen dynaamisissa mittauksissa käytetty DasyLab-ohjelma.

Dynaamiset mittaukset mahdollistava mittausjärjestely ei toimi pitkään ilman verkkovirtaa. Sähköä saatiin Viialan kohteessa radan turvalaitteista. Dynaamiset mittaukset tehtiin 2000 Hz mittaustaajuudella. Ratapölkyn venymämittauksissa ja penkereen muodonmuutoksen mittauksissa olisi riittänyt matalampikin mittaustaajuus, mutta junakuorman mittaus edellytti melko suurta mittaustaajuutta. Mittausohjelma mittasi jatkuvasti, mutta signaalit tallennettiin vain tiettyjen ehtojen täytyessä. Järjestelmä seurasi kerroksittaisen muodonmuutosanturin ylintä anturia, joka oli kiinnitetty ratapölkkyyn. Kun anturissa tapahtui yli 0,2 mm liike, tallennettiin kaikki signaalit 0,5 sekuntia liipaisua edeltävältä ajalta ja 1,5 sekuntia liipaisun jälkeen. Junan nopeudesta riippuen, junasta tallentui 3-6 vaunun aiheuttamat radan rasitukset. Mittausdata tallennettiin tietokoneen kovalevylle. Mittausohjelmaan oli syötetty kalibrointikertoimet valmiiksi. Signaalit tallentuivat siten oikeassa yksikössä. Mittausdatan käsittelyssä on kuitenkin huomioitava, että joidenkin antureiden nollatasot saattavat ryömiä ajan kuluessa. Ongelma koskee erityisesti vahvistettuja signaaleja, kuten venymäantureita ja kiskovoimia. Signaalien dynaamiseen osaan ryömintä ei vaikuta.

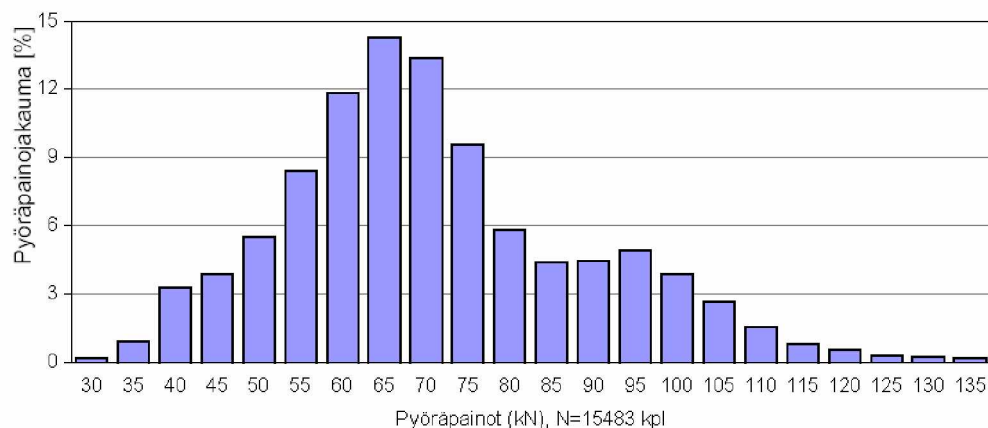
Joitakin suureita oli mahdollista käsitellä automaattisesti tiedonkeruun yhteydessä. Aluksi mittausohjelmasta rakennettiin varsin kattava. Sen avulla pystyttiin tallentamaan akseleittain tai teleittäin kiskovoimat, ratapölkyn venymät, ratapölkyn liikkeitä ja penkereen muodonmuutokset. Alkuperäinen mittausohjelma osoittautui turhan raskaaksi tietokoneelle ja järjestelmästä tuli epävakaa. Tietokone jumittui aika ajoin. Testauksen jälkeen mittausohjelmaa yksinkertaistettiin ja siirryttiin tallentamaan ainoastaan raakadataa edellä kuvatus mukaisesti. Kiskovoimat tallennettiin kuitenkin edelleen akseleittain. Kiskovoimien tallennus katsottiin tarpeelliseksi tehdä kaikista akseleista, jotta myöhemmin voitaisiin arvioida radan liikennemäärä mahdollisimman objektiivisesti. Venymäliuskojen ryömintä poistettiin kiskovoimista laskemalla usean sekunnin mittainen keskiarvo mittaussignaalista viiden minuutin välein, laittamalla tulos talteen muuttujaksi ja vähentämällä muuttuja alkuperäisestä signaalista. Näin kiskovoimat alkoivat aina nolasta ja pyöräpaino pystyttiin määrittämään signaalin minimin perusteella.

Mittaustietokone varustettiin liikkuvalla laajakaistalla eli niin sanotulla mokkalalla. Tietokoneeseen saatiin yhteys verkon kautta toimistolta tai periaatteesta mistä tahansa. Etäyhteyden avulla tarkastettiin mittauksen toimivuutta ja tehtiin tarvittaessa säätöjä. Verkon yli pystyttiin myös siirtämään mittausdataa käsittelyä varten. Mittausdataa kertyi noin 60 megatavua päivässä. Kyseisen datamäärän siirtäminen morkulan välityksellä oli toki mahdollista, mutta aikaa vievää. Etäyhteyttä käytettiin pääasiassa vain mittausjärjestelmän tarkkailuun ja data siirrettiin toimistolle ulkoisen kovalevyn avulla.

4.3.4 Lyhyt katsaus mittaustuloksiin

Ratarakenteen kuormat

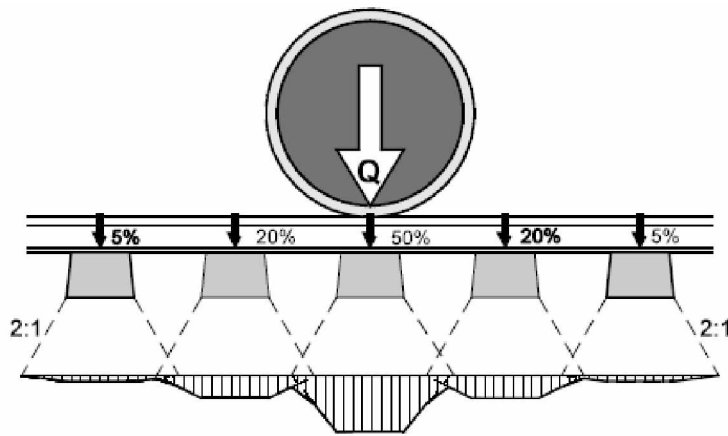
Junan aiheuttama kuormitus välittyy ratarakenteisiin akseleiden kautta. Akselipainomittaus tehtiin ainoastaan toisesta kiskosta, joten mittaus oli oikeastaan pyöräpaimittaus. Mittaustulosten mukaan radalla liikennöi huhtikuun 2009 lopussa arkipäivisin noin 70 junaa. Viikon ajalta mitattujen junien pyöräpainot olivat yhteensä noin 0,11 miljoonaa tonnia. Kyseisellä raiteella kulki siten noin 0,22 Mbrt kalustoa, mikä tekee suoraan ekstrapoloiden noin 11,5 Mbrt vuodessa. Pyöräpaino oli keskimäärin 70,7 kN. Viikon ajalta mitattujen pyöräpainojen jakauma on esitetty kuvassa 4.12. Jakaumassa eivät ole mukana alle 30 kN painoiset pyörät, joita kuitenkin liikkui tyhji- en tavaravaunujen muodossa raiteella jonkin verran. Jakaumasta erottuvat henkilöjunien vaunut, joiden pyöräpaino oli noin 60–70 kN ja täyteen kuormatut tavaravaunut ja veturit, joiden pyöräpaino oli noin 80–105 kN. Tätä suurempia pyöräpainoja havaittiin suhteellisen vähän. On syytä huomata, että mittauskohde sijaitsee kaarteessa ulkokiskossa, minkä seurauksena hitaammin liikennöivien tavarajunien akselit aiheuttavat suhteessa pienempiä kuormia kuin nopeasti liikennöivät henkilöjunat. Mittausjärjestelyn kalibrointi tehtiin henkilöjunien perusteella.



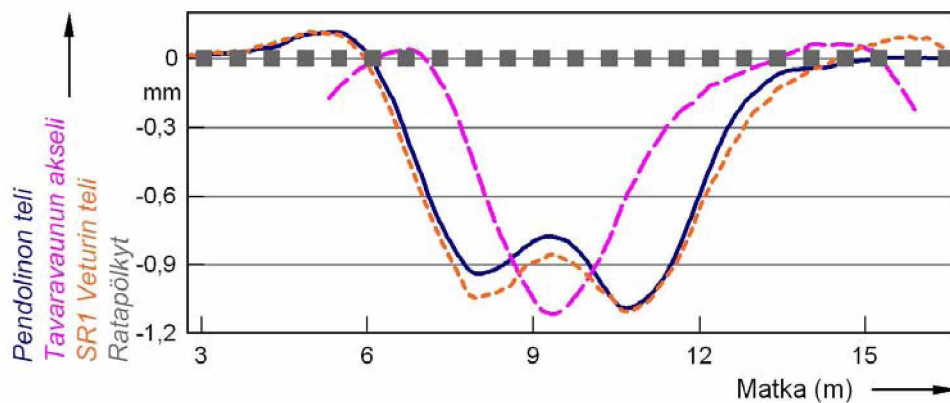
Kuva 4.12 Raiteelta mitattujen pyöräpainojen jakauma ajanjaksolla 17.4.–23.4.2009.

Kisko jakaa yhden akselin kuormat usealle ratapölkylle. Yleisesti yksinkertaistetaan, että noin puolet akselipainosta kohdistuu yhdelle ratapölkylle, noin 20 % tämän viereisille ratapölkylle ja noin 5 % kuormasta kohdistuu sitä seuraaville ratapölkylle (kuva 4.13). Ratapölkyn siirtymän mittaustuloksen perusteella havaittiin, että 60E1 kisko jakoi kuormat oletusta useammalle ratapölkylle. Kiskon taivutusjäykkyyden takia ratapölkkyt myös nousivat hieman ennen akselin ylitystä. Akseli vaikutti kolmeen ratapölkkyyn nostavana ja 9–14 ratapölkkyyn painavana riippuen akselirakenteesta ja ratarakenteen jäykkyydestä. Telin akseleiden välissä kaikki ratapölkkyt olivat kuormi-

tettuna alaspäin. Yksittäinen akseli kuormitti ratapölkkyjä alaspäin vajaan kuuden metrin matkalta ja teli noin 8 metrin matkalta (kuva 4.14).



Kuva 4.13 Otaksoma pystysuorien kuormien jakaantumisesta ratapölkkyistä tukikerrokseen (Ramo 11).

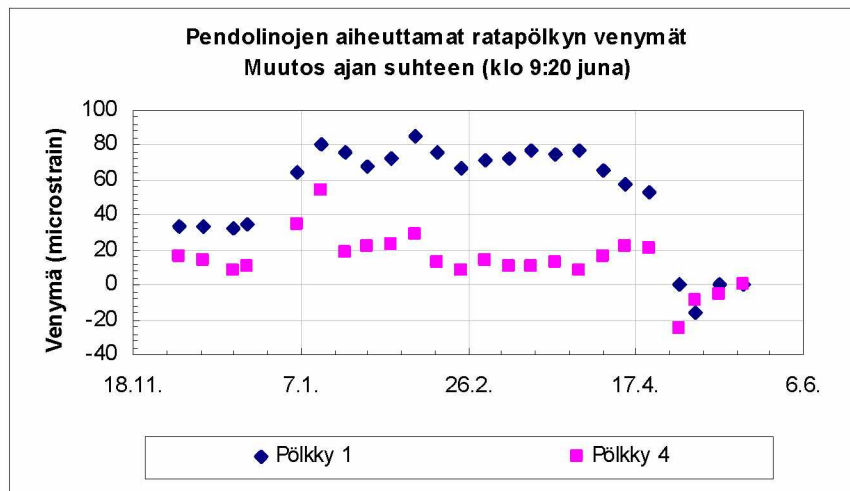


Kuva 4.14 Ratapölkkyjen pystysuuntaiset siirtymät erilaisten akseli- ja telikuormien vaikutuksesta.

Ratapölkkyjen siirtymät eivät vastaa suoraan kuormitusta, sillä maarakenteiden epälineaarisen käyttäytymisen takia ratapölkkyjen liike ei kasva suoraan kuorman suhteen. Lisäksi rakenteen jäykkyys ja sen vaihtelut vaikuttavat kiskon kuormia jakavaan vaikutukseen ja siten pölkyn siirtymään. Mittaustulosten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että 60E1 kisko jakaa mittaustuloksissa kuormitukset laajemmalle alueelle kuin otaksutaan. Havainnot perustuvat vain muutamaan satunnaisotannalla valittuun junaan, joten asian todentaminen vaatii tarkempaa analyysiä. Alustavien havaintojen mukaan yksittäisen ratapölkyn kohtaama kuormitus olisi kuitenkin oletettua pienempi.

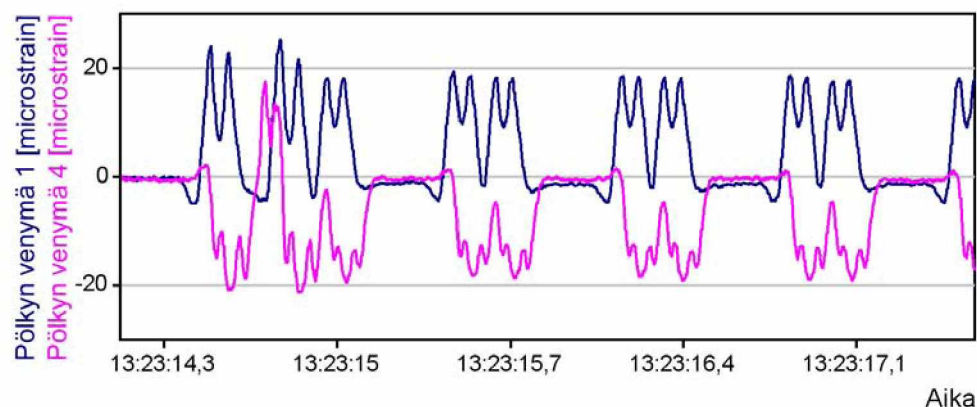
Ratapölkyn rasitukset

Ratapölkyn taivutuksen aiheuttamaa muodonmuutosta mitattiin ratapölkyn yläpinnasta kuudella venymäanturilla. Pääosa mittaushavainnoista oli venymää, mikä tarkoittaa, että ratapölkyn päät taipuivat alaspäin. Venymän suuruus vaihteli satunnaisotannassa $-20 - 100$ microstrainin ($\text{mm/mm} \times 10^{-6}$) välillä (kuva 4.15). Talven aikana muodonmuutos oli merkittävästi positiivista eli venymää. Suurimmat venymät havaittiin tammikuun puolivälissä, mitä edelsi muutaman päivän suojakausi. Keväällä osassa ratapölkkyistä havaittiin myös negatiivista muodonmuutosta eli puristusta.

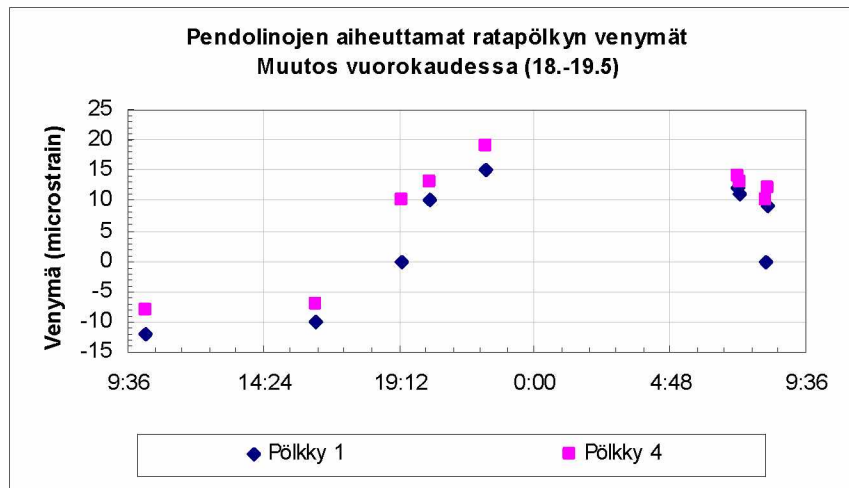


Kuva 4.15 Pendolinojen aiheuttamat ratapölkyn yläpinnan dynaamiset muodonmuutokset raiteen keskellä talvikaudella 2008–2009.

Muodonmuutosten ollessa pieniä jo perättäisten ratapölkkyjen dynaaminen muodonmuutos saattaa erimerkkinen (kuva 4.16). Mielenkiintoista oli havaita, että ratapölkyn dynaaminen muodonmuutos saattoi vaihtaa merkkiä myös vuorokauden ajan mukaan (kuva 4.17). Päivällä ratapölkyn yläpinnan muodonmuutos oli negatiivista ja yöllä positiivista. Ilmiö liittyy todennäköisesti koekohteen sijaintiin kaarteessa ja kiskojen jännitysmuutoksiin. Toinen askarruttava seikka havaittiin liittyen veturin telien välillä tapahtuneeseen ratapölkyn muodonmuutokseen (ks. kuva 4.16, signaali Pölkyn venymä 4). Lähes kaikki veturit aiheuttivat ainakin johonkin mittauksessa olleeseen ratapölkkyyn venymäpiikin, minkä aiheuttajaa ei lyhyen tarkastelun pohjalta pystytty selvittämään. Venymäpiikki oli usein jopa suurempi kuin varsinainen akselien ratapölkkyihin tuottama venymä. Oletettavasti ilmiö liittyy veturin vetovoiman aiheuttamiin jännitysmuutoksiin kiskoissa ja sen seurauksena tapahtuvaan ratapölkyn hetkelliseen asennonmuutokseen. Kokonaisuutta ajatellen on huomattava, että venymätasot olivat kaikissa mittauksissa varsin alhaisia.



Kuva 4.16 Kahden eri ratapölkyn yläpinnan dynaaminen venymä samasta junasta mitattuna. Ratapölkkyjen etäisyys oli vain 1,8 metriä, mutta pölkyn muodonmuutos saattoi olla erimerkkinen.



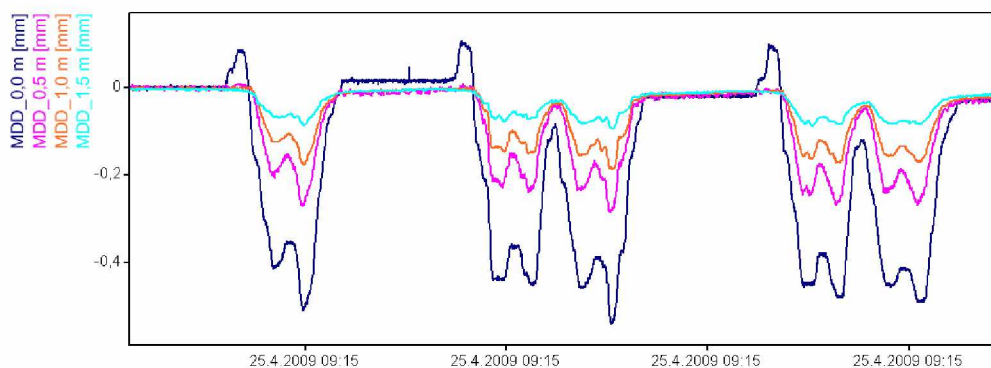
Kuva 4.17 Vuorokauden aikana tapahtuneet muutokset ratapölkyn dynaamisessa taivutuksessa.

Vastaavat havainnot vuodenaikaisvaihtelun vaikutuksesta ratapölkyn taivutukseen tehtiin myös ratapölkyn absoluuttista korkeusasemaa mittaavista siirtymäantureista. Satunnaisotoksen perusteella pystysuuntaiset ratapölkyn liikkeen maksimit vaihtelivat talven ja kevään aikana 210 kN akselikuorman kuormittamana 0,5–1,7 mm välillä. Yllättävintä havainnoissa oli, että suurimmat liikkeet havaittiin talvella tammikuun puolivälissä lyhyen leudon jakson aikana. Tuolloin ratapölkyn toinen pää liikkui junan vaikutuksesta noin 1,6 mm ja toinen pää 0,7 mm, mutta ratapölkyn keskikohta ei liikkunut lainkaan. Myös ratapölkyn yläpinnan venymät olivat kyseisenä aikana suurimmillaan. Ratapölkyn päiden liikkeessä näkyi selvästi junan nopeuden vaikutus, sillä kaarteissa sijaitsevassa koekohteessa nopeat junat kuormittivat selvästi enemmän kaarteiden ulkokiskoa. Tavarajunilla ratapölkyn päiden liikkeet olivat yhtä suuria.

Penkereen kerroksittaiset muodonmuutokset

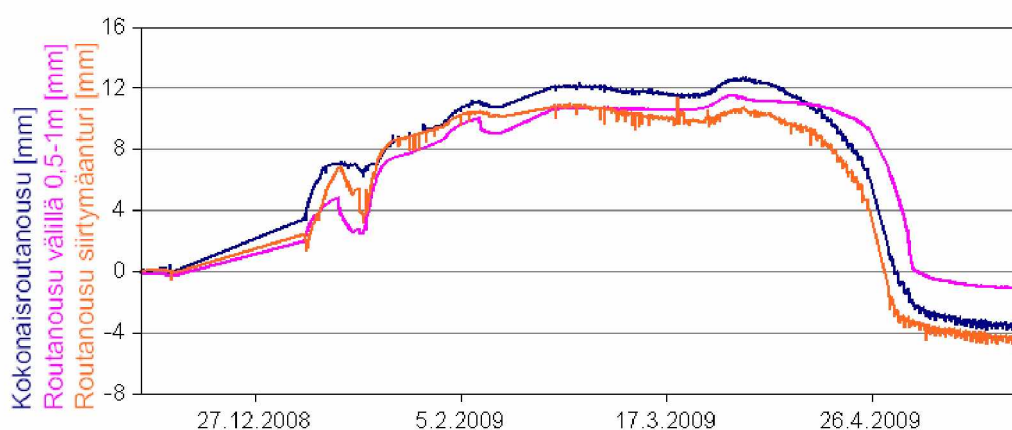
Penkereen kerroksittaisen muodonmuutosanturin ankkurointi onnistui vain kohtalaisesti, sillä heti mittausten alkaessa huomattiin ankkuritangon pyrkivän painumaan penkereeseen dynaamisen kuormituksen vaikutuksesta. Ilmeisesti anturit olivat hie-man eri linjassa tangon suhteen ja anturien liike pyrki viemään tankoa mukanaan. Ankkuritanko olikin hyvin löyhästi kiinni pohjamaassa, sillä sen asemaa pystytettiin helposti muuttamaan käsin tangon yläpäästä vetämällä. Ankkuritanko kuitenkin asetui tukevasti ajan kuluessa, mutta alin anturi ei osunut mitta-alueelle. Siten anturin avulla pystytettiin tarkkailemaan vain neljän ylimmän anturin liikettä ja siten penkereen pystysuuntaisia muodonmuutoksia ylimmän 1,5 metrin matkalta.

Mittaustulosten mukaan noin puolet ratapölkyn liikkeestä syntyi tukikerroksen kokoonpuristumasta ja loput alempien rakenteiden kokoonpuristumasta (kuva 4.18).



Kuva 4.18 Penkereen kerroksittaiset liikkeet suhteessa 3 metriä syvällä sijaitsevaan ankkuriin. Noin puolet ratapölkyn liikkeestä syntyi tukikerroksessa (0-0,5 m) ja loput tätä alemmissa kerroksissa.

Kerroksittaisen muodonmuutosanturin avulla mitattiin myös routanousua. Routanousun mittaus onnistui teknisesti hyvin. Ankkuroitavuusongelman takia ankkuritangon yläpäähän asennettiin rajoitin, joka esti ääritilanteissa ankkuritankoa painumasta maan syvyyskiin. Routanousun edetessä kyseinen rajoitin otti kiinni ratapölkkyyn kiinnitettyyn anturiin ja veti mukanaan ankkuria. Tästä huolimatta routanousu pystyttiin laskemaan eri antureiden välisen muutoksen perusteella. Kerroksittaisen muodonmuutosanturin perusteella laskettu kokonaisroutanousu, syvyydellä 0,5...1,0 metriä tapahtunut routanousu ja viereisestä pölkystä siirtymäanturilla mitattu routanousu ajan suhteen on esitetty kuvassa 4.19. Vierekkäisten pölkkyjen kokonaisroutanousu oli käytännössä samanlainen. Routanousu tapahtui lähes kokonaan välillä 0,5-1,0 metriä. Saman päätelmän voi tehdä lämpötilan ja routanousun perusteella kuvasta 3.9. Loput muutoksesta tapahtui raidesepelissä, mutta muutos oli todennäköisesti suurimmaksi osaksi tukikerroksen tiivistymistä, koska ratapölkyn asema jäi routan sulamisen jälkeen selvästi alkutilannetta alemmaksi.



Kuva 4.19 Kerroksittaisella muodonmuutosanturilla mitattu kokonaisroutanousu, routanousu väliltä 0,5...1,0 m ja vierekkäisen pölkyn kokonaisroutanousu siirtymäanturilla mitattuna. Routanousu tapahtui suurimmaksi osaksi välillä 0,5...1,0 metriä.

4.4 Mittausmenetelmien käytettävyys ja hyötykustannukset

Viialassa tehtyjen talven yli kestäneiden mittausten perusteella pystyttiin arvioimaan eri mittausmenetelmien käytettävyyttä ja niillä saavutettuja hyötyjä mittauskustannuksiin verrattuna. Kaikki maastoon asennetut mittausmenetelmät toimivat suhteellisen hyvin eikä karkeita virhearvioita mittausmenetelmien suhteen tehty. Eri mittausmenetelmillä pystyttiin mittaamaan hieman eri asioita ja menetelmien asettaminen paremmuusjärjestykseen ei ollut välttämättä edes mahdollista.

Kaikkien mittausten lähtökohtana on akselipainomittaus, sillä ilman tietoa kuormista dynaamisten mittausten tulkinta on melko epätarkkaa. Tietenkin on mahdollista hyödyntää vain veturien kuormitusta, sillä niiden akselipainot tiedetään. Kuitenkin esimerkiksi kaarre vaikuttaa pyöräpainoihin ja eri nopeuksilla samakin pyöräkuorma tuottaa erilaisen kuormituksen. Akselipainomittaus on siten dynaamisten mittausten kannalta välttämätön.

Ratapölkyn taivutuksen mittaamiseen soveltuu kaksi menetelmää: siirtymämittaus kovan pohjan suhteen kolmesta eri pisteestä pölkyn matkalta tai pölkyn yläpinnan muodonmuutoksen mittaus pölkyn keskeltä. Ensimmäisen vaihtoehdon avulla saadaan tieto routanoususta, kaartein ja siten ajonopeuden vaikutuksesta mittaustuloksiin sekä tieto ratapölkyn pitkäaikaisesta vajoamisesta tai painumasta penkereeseen. Menetelmällä saadaan tieto myös ratapenkereen kimmoisista ominaisuuksista. Pelkän ratapölkyn yläpinnan muodonmuutoksen perusteella saadaan ainoastaan tieto ratapölkyn kohtaamasta taivutuksesta. Jälkimmäinen vaihtoehto on selvästi helpompi toteuttaa, mutta se antaa selvästi vähemmän tietoa penkereen ominaisuuksista.

Penkereen kerroksittaisen muodonmuutoksen mittausanturit antavat tietoa penkereen ominaisuuksista. Anturien avulla saadaan tieto esimerkiksi tukikerroksen kokoonpuristumasta. Menettely sopii sekä dynaamisiin mittauksiin että pysyvien muodonmuutosten määrittämiseen. Menetelmä soveltuu myös routivan kerroksen havaitsemiseen. Routimisen havainnointiin menetelmä on kuitenkin melko hintava, sillä vastaava tieto saadaan selville yksinkertaisemmin havaintotangon ja siirtymäanturin sekä lämpötilamittauksen avulla. Routamittauksissa lämpötilatieto on tärkeä havaintojen ymmärtämiseksi.

Routatarkastelujen kannalta dynaamiset mittaukset eivät anna merkittävästi lisäarvoa. Asia on pikemmin toisin päin, eli routamittaukset antavat huomattavaa lisäarvoa dynaamisille mittauksille, olipa tarkasteltavana kohteena sitten kisko, ratapölkky tai ratapenger. Kokonaisuuden ymmärtämiseksi monipuolisen mittausjärjestelyn toteuttaminen on erittäin tärkeää. Yksittäisellä mittauksella voidaan saada aikaiseksi mitaustulos, joka pätee vain hetken ajan. Pitkäkestoisilla mittauksilla saadaan kattavampi kuva kokonaisuudesta. Lisäksi mittausjärjestelyjä on syytä toteuttaa useissa kohteissa rakenteen todellisen käyttäytymisen ymmärtämiseksi.

4.5 Haastattelut

Haastattelujen tarkoituksena oli kartoittaa eri toimijoiden näkemyksiä ratarakenteisiin liittyvistä mittaustarpeista. Tavoitteena oli selvittää mitä kaikkea on nähty tarpeelliseksi mitata tai arvioida, mutta tarkasteluun ei ole ollut käytettävissä sopivaa menetelmää. Haastattelut tehtiin kohdennetulle ryhmälle, johon kuului henkilöitä Ratahallintokeskuksesta, VR-Rata Oy:stä ja Pöyry Infra Oy:stä. Haastatteluja tehtiin sähköpostitse, puhelimella ja tapaamisissa keväällä 2008 sekä keväällä 2009.

Kaikissa haastatteluissa tuli esille stabiliteetiltaan heikkojen penkereiden valvontatarve. Liikkeiden lisäksi on tarve seurata huokosvedenpainetta ja tehdä vertailua näiden kahden suureen kesken. Tällaista vertailua ei ole tehty eikä siten tarkalleen tiedetä miten asiat kehittyvät ajan suhteen. Toinen hyvin samantapainen mittaustarve liittyi rakentamisen aikaisiin mittauksiin. Työnaikaisten liikkeiden valvonnassa (kiskot ja penger) koettiin olevan tarvetta parannuksiin. Rakentamisen aikaiset vauriot kuten kiskojen kolhut ovat myös hankalasti määritettävissä.

Siltojen läheisyydessä ilmenee toistuvaa kunnossapitotarvetta. Pysyväksi korjauskeinoksi esitetään usein siirtymälaattojen rakentamista, mutta niiden hyödyllisyydestä ei olla aina täysin varmoja. Syitä tuentatarpeeseen ei ole dokumentoitu riittävästi, jotta tiedettäisiin varsinainen ongelmanaiheuttaja. Selkeä tarve on selvittää miten penger käyttäytyy sillan läheisyydessä junakuorman vaikutuksesta. Vanhojen siltojen käyttöiän laskenta on ongelmallista. Erityisesti vanhojen terässiltojen käyttöikä tulisi määrittää mittauksin. Mittausmenetelmää siltojen kantavuustarkkailuun ei ole kuitenkaan olemassa.

Rumpujen kuntoa ja kantavuutta ei tiedetä. Vanhojen kivrumpujen toimintaa on vaikea mallintaa laskennallisesti. Kivirummun korvaamiseen uudella ei ole aina selkeitä perusteita, vaikka niin tehdäänkin – varmuuden vuoksi. Mitään hyvää keinoa rummun kunnan todentamiseksi tai valvomiseksi ei ole tiedossa. Myös rumpujen lämpötekniinen käyttäytyminen vaatisi mittauksia, jotta saataisiin selville rumpujen routasuojatarve koskien etenkin jälkiasennettavia rumpuja, mutta myös kaivamalla asennettavia rumpuja.

Routaan liittyen on tarve selvittää milloin routalevyjen asentaminen on perusteltua. Nykyisin routasuojasta tehdään lähinnä pengerpaksuuden perusteella. Routasuojauksen tarpeellisuus tulisi pystyä määrittämään myös mittauksin. Tärkeää olisi selvittää miten routa-asiat vaikuttavat laajassa mittakaavassa radan tasaisuuteen. Murskatuista materiaaleista valmistettujen ratapenkereiden lämpötekniisiin ominaisuuksiin mahdollisesti vaikuttavan konvektion olemassaolo ja merkitys tulisi selvittää.

Junakuorman vaikutuksesta jyrkät pengerluiskat löytyvät ja luiskien tilaa ei tiedetä. Luiskien lakoaminen aiheuttaa raiteeseen muodonmuutoksia. Radan rakennekerrosten kuormituskestävyyttä ei tiedetä eikä mitoiteta vaan mitoitus perustuu routamitoitukseen. Tärkeää olisi myös tietää radan kuormituskestävyys ja toimivan radan edellyttämä kuormituskestävyys (rakennekerrosmateriaalien jäykkyys, tiiveys, luiskakaltevuus yms. asiat). Esimerkiksi rakennekerrosten tiiveysmittauksissa ilmenneiden ongelmien perusteella on ilmennyt tarve yksityiskohtaiselle menetelmäohjeille tiiveysmittausten tekemiseksi. Yhtenä menetelmänä esiin nousi itse mittaavan jyrän käyttöpotentialin selvittäminen.

Dynamiikan puolella esille nousseet mittaustarpeet liittyivät lähinnä liikennetärinään ja siten heilahdusnopeuden määrittämiseen. Kalustosta rataan kohdistuva dynaaminen kuormitus ja sitä aiheuttavat kalusto- ja ratatekijät vaatisivat myös selvittämistä.

5 Päätelmät ja jatkotutkimustarpeet

5.1 Stabiliateeltaan heikkojen ratapenkereiden valvonta

Tutkimuksessa selvitettiin vaihtoehtoja stabiliateeltaan heikkojen ratapenkereiden siirtymien valvontaan. Erilaisia mittausten menetelmiä kartoitettiin kirjallisuudesta ja kotimaisilta mittalaitetoimittajilta. Lisäksi tehtiin omaa tuotekehitystä laboratoriossa erilaisten vaihtoehtojen toimivuuden testaamiseksi ja menetelmien soveltuvuuden selvittämiseksi.

Selvästi pisimmälle jalostettu siirtymien mittaamiseen tarkoitettu mittausten menetelmä on automaatti-inklinometri. Sen avulla voidaan selvittää maakerrosten vaakasuuntaiset liikkeet kerroksittain yhdessä paikassa. Pistemäisen mittausten menetelmän heikkouksena on laitteen sijoittamiseen liittyvät haasteet mittausten kohteella. Jos sortuvaksi epäilty kohta tiedetään muutaman metrin tarkkuudella, automaatti-inklinometri on paras vaihtoehto valvonnan järjestämiseksi. Automaatti-inklinometrin mittaustarkkuus molemmissa vaakasuunnissa on laitteen pituudesta riippuen muutamia millimetrejä.

Kun valvottavan ratapenkereen pituus on selvästi pidempi, esimerkiksi 100-200 metriä, automaatti-inklinometrin käyttö koituu kalliiksi. Tällaiseen kohteeseen soveltuu paremmin tutkimuksessa kehitetty automaattinen painumaletku. Painumaletku koostuu putkesta, jossa on nestettä ja paineantureita halutuin välein. Painumaletkun avulla voidaan kohtuullisilla kustannuksilla mitata kymmeniä pisteitä. Painumaletku voidaan asentaa joko suhteelliseksi ja mitata painumaeroja tai absoluuttiseksi ja mitata kokonaispainumaa. Valvontamielessä suhteellinen asennustapa saattaa olla parempi, sillä ratapenkeret painuvat pehmeiköillä ilman että se on stabiliateetin kannalta vaarallista. Ero painumanopeudessa saattaisi olla siten paras indikaattori stabiliateetin heikkenemisestä. Painumaletkun mittaustarkkuus on korkeussuunnassa muutamia millimetrejä.

Venymämittaus valokuidun avulla on toinen mahdollinen vaihtoehto hajautetusta mittausten menetelmästä. Valokuitu soveltuu asennettavaksi radan pituussuuntaan painumaletkun tavoin. Valokuidun avulla voidaan paikantaa mahdollinen penkereen liike esimerkiksi 20 metrin tarkkuudella. Valokuitu ei kerro suoraan penkereen liikkeen suuruutta eikä suuntaa. Valokuitua voidaankin käyttää lähinnä sortumasta varoittavana hälyttimenä. Penkereen liikkeen suuruus tulee mitata muilla menetelmillä. Tutkitun menetelmän mittaustarkkuus on venymän suhteen 1 mm. Penkereen siirtymäksi muutettuna se vastaa asennustavasta riippuen 5-100 mm liikettä penkereessä. Mittaustarkkuus on heikoin silloin, kun kaapeli asennetaan suoraan penkereen suuntaisesti. Erilaisilla siksak-muodoilla mittaustarkkuutta voidaan hieman parantaa, mutta niiden seurauksena liikesuunnan arviointi hankaloituu edelleen.

5.2 Roudan monitorointi

Tutkimuksessa selvitettiin mahdollisuutta mitata roudan syvyys ja routanousu kentällä automaattisesti. Eri vaihtoehtoja selvitettiin kirjallisuudesta ja kotimaisilta mittalaitetoimittajilta. Roudan syvyyden mittaamiseen lämpötilan perusteella oli tarjolla lukuisia erilaisia antureita ja mittausjärjestelyjä, mutta valmista kaupallista konseptia koko ongelman ratkaisemiseksi ei löydetty. Eniten haasteita tuotti akkutoimimisen dataloggerin löytäminen. Sellaisia hankittiin lopulta Hollannista. Lämpötila-anturit valmistettiin itse puolijohdekomponenteista. Routanousua mitattiin siirtymäantureiden avulla kolme metriä syvään asennetuista havaintotangoista, joiden oletettiin pysyvän paikoillaan. Siirtymäanturit hankittiin suomalaiselta toimittajalta.

Mittausjärjestely toimi kokonaisuuden kannalta talven ajan lähes moitteetta. Mittausdata lähetettiin toimistolle GPRS-yhteyttä käyttäen. Mittaustulosten analysoinnissa havaittiin, että routa sulii lämpötilojen muutosnopeuden perusteella arvioituna kaikissa kohteissa selvästi nollan asteen alapuolella. Tämä aiheutui kuitenkin pääasiassa lämpötilojen mittausvirheestä, sillä karkearakeisessa materiaalisessa vesi sulaa lähestulkoon nollassa asteessa. Lämpötilan perusteella tapahtuva roudan syvyyden arviointi ei siten voi perustua yksin mitattuun nollarajaan, vaan routaantumissyvyys on määritettävä antureittain myös aika-lämpötilakäyrän perusteella. Roudan sulaessa lämpötila pysyy vakiona pitkään jään sulamislämmön vaikutuksesta. Lämpötilamittauksen oikeellisuuden varmistamiseksi lämpötila-anturit on kalibroitava kyseisten antureiden mittaukseen käytettävän dataloggerin avulla.

Routaantumissyvyys vaihtelivat kohteittain pölkyn yläpinnasta mitattuna 0,8–2,0 metrin välillä. Roudan syvyys kasvoi oletetusti pakkasmäärän lisääntyessä ja vuoden keskimääräisen lämpötilan laskiessa. Oikoradan murskatuista kiviaineksista tehty ratapenger jäätynä selvästi tavanomaisia penkereitä syvemmälle. Routanousuhavaintoja tehtiin eniten Pääradalla Viialassa, missä routanousu oli enimmillään noin 12 millimetriä. Myös muilla kohteilla havaittiin pieniä pölkyn pysyviä liikkeitä, mutta niiden suuruudella ei ollut radan tasaisuuden kannalta merkitystä.

5.3 Radan rakenteen monitorointi

Betoniratapölkkyjen kohtaamien rasitusten selvittämiseksi kenttäoloissa kehitettiin yksinkertainen jälkiasennettava mittausjärjestely. Siihen kuuluvat ruuvikiinnitteiset venymäanturit ratapölkyn yläpinnan muodonmuutoksen mittaamiseen ja venymäliuskat akselikuormien mittaamiseen. Näiden lisäksi mittausjärjestely tarvitsee signaalivahvistimen, dataloggerin ja mittaustietokoneen. Järjestely on helposti siirrettävissä kohteisiin, joissa on verkkovirtaa saatavilla. Tilapäisesti voidaan toimia myös akun tai aggregaatin avulla.

Penkereen kerroksittaisten muodonmuutosten mittaamista varten kehitettiin mittausanturi, joka on jälkiasennettava. Anturi koostuu vesitiiviistä siirtymäantureista, jotka mittaavat saman ankkuritangon suhteen. Anturin avulla voidaan selvittää penkereen sekä dynaamiset että pysyvät pystysuuntaiset muodonmuutokset ja mitata routanousu kerroksittain.

Viialassa talven 2008 - 2009 yli kestäneissä mittauksissa rakenteen käyttäytymisessä havaittiin olevan huomattavaa vaihtelua ajan suhteen. Ratarakenteen kokonaisvaltaisen käyttäytymisen ymmärtäminen vaatii pitkäaikaista monitorointia. Yksittäinen tiettynä ajankohtana tehty mittaus voi antaa kokonaisuuden kannalta virheellisen kuvan rakenteen toiminnasta.

Tutkimusosiossa tehtiin haastatteluja, joiden avulla selvitettiin muita rataympäristöön liittyviä mittaus- ja monitorointitarpeita. Päälimmäiseksi niistä nousivat tässä tutkimuksessa selvitettyjen ongelmien lisäksi siltapäätien siirtymälaattojen tarpeeseen liittyvät mittaukset sekä ratarumpujen ja etenkin kivirumpujen kunnon arviointi. Siltapäätien liittyviä ratapölkkyjen dynaamisia siirtymämittauksia on tehty yhteistyössä VR-Rata Oy:n kanssa. Ratarumpuihin liittyvät kysymykset ovat vielä selvittämättä.

5.4 Jatkotutkimustarpeet

- Kehitetyn painumaletkun tuotteistaminen prototyyppiasteelta tuotteeksi, jota jokin taho myy, asentaa ja kehittää sekä tuottaa mittauspalvelua.
- Tämän tutkimuksen puitteissa ei vielä selvitetty stabiliteettiosiossa syntyneiden mittausmenetelmien toimintatapaa varsinaisten hälytysten suhteen. Selvittävänä ovat muun muassa raja-arvot, joiden ylittyessä hälytys pitäisi antaa. Jatkokehitystä vaatii myös tekninen järjestely miten hälytys annetaan. Myös prosessi siitä kenelle tai minne hälytys annetaan ja miten hälytyksen jälkeen toimitaan, on vielä pohtimatta.
- Paimioon rakennetun seuranta-kohteen mittauksia on syytä jatkaa. Ajan kuluessa saadaan selville muun muassa laitteistojen pitkäaikaiskestävyys.
- Routaosiossa varsinainen mittaustulosten analysointi tehtiin hyvin pintapuolisesti ja asioita pohdittiin tässä vaiheessa lähestulkoon ainoastaan mittausmenetelmän toimivuuden kannalta. Mittaustulokset tulisi analysoida tarkemmin ja tehdä lisämittauksia raiteen epätasaisuudesta routivissa kohteissa. Lämpötilan ohella seuranta-kohteista tulisi mitata myös materiaalien vesipitoisuutta.
- Ratapenkereen routivuuden ja myös routasuojauksitarpeisiin liittyvän kokonaisymmärryksen kasvattaminen. Tavoitteeseen voidaan päästä hyödyntämällä nyt käyttöön otettua mittaustekniikkaa. Routaseurantaa on syytä jatkaa edelleen ja myös lisätä kohteiden lukumäärää.
- Oikoradalta mitatun, muihin ratapenkereisiin verrattuna poikkeavan, roudan syvyyden syiden selvittäminen. Mahdollisen konvektion osuuden selvittäminen murskatuista kiviaineksista rakennetun ratapenkereen lämpötekisessä käyttäytymisessä. Tehtyjen mittausten mukaan murskatuista materiaaleista rakennettu ratapenger jäätyy samalla pakkasmäärällä jopa 50% syvemmälle kuin tavanomaisista materiaaleista rakennettu ratapenger.
- Ratarakenteen monitorointiosiossa tehtyjen haastattelujen perusteella jatkossa on tarvetta kehittää menetelmiä ratarumpujen muodonmuutos- ja lämpö-

tekniisiin mittauksiin. Vastaavia mittauksia tulee kehittää myös silloille, jotta niiden käyttöikä- ja kantavuustarkasteluja pystytään tekemään.

- Haastatteluissa ilmeni tarve mitata ratapenkereen kuormituskestävyyttä ja ottaa se huomioon mitoituksessa. Nykyisellään ratapenkereen paksuuden mitoitus perustuu käytännössä pelkästään routamitoitukseen. Etenkin tukikerroksen alustan eli välikerroksen kuormituskestävyys tulisi pystyä luotettavasti todentamaan. Osaltaan tämä voi edellyttää sekä eristys- ja välikerrosta koskevien materiaali-, tiivistys- ja tiivistystarkkailuvaatimusten tarkistamista että tarkkailumittauksiin liittyvää menetelmäkehitystä. Tukikerroksen alapuolisen kerroksen parantamiseen on kalustoakin saatavilla ja osaltaan selvitys tukisi kalustosta saatavien hyötyjen selvittelyä.

Lähdeluettelo

Ehrola, E. 1996. Liikenneväylien rakennesuunnittelun perusteet. Rakennustieto Oy, Helsinki.

Kane, W. F., Holzhausen, G. R., Constable, E. 2004. Coastal bluff monitoring/alert system for railways. Geotechnical Special Publication, n 126 II, p 2067-2074, 2004, Geotechnical Engineering for Transportation Projects: Proceedings of Geo-Trans 2004

Luomala, H. 2006. Infra- ja maarakenteiden mittaukset -projektin laboratoriokokeet TTY:llä. TTY, Julkaisematon raportti.

Nurmikolu, A. 2007. Betoniratapölkkyjen toistokuormitustestaus erilaisilla tukikerroksilla. TTY, Julkaisematon raportti.

Ratatekniset määräykset ja ohjeet, Ramo 11 Radan päällysrakenne. Ratahallintokeskus, Helsinki 2002.

Ratatekniset ohjeet, RATO 3 Radan rakenne. Ratahallintokeskus 2005b, Helsinki. 44 s. 2 liites.

Ryhänen, A., Ylönen, S., Luomala, H., Kolisoja, P., Mäkelä, H., Halkola, H. 2007. Continuous Ground Movement Measurements. Geotechnical Engineering in Urban Environments. Madrid 2007. Vol. 2.

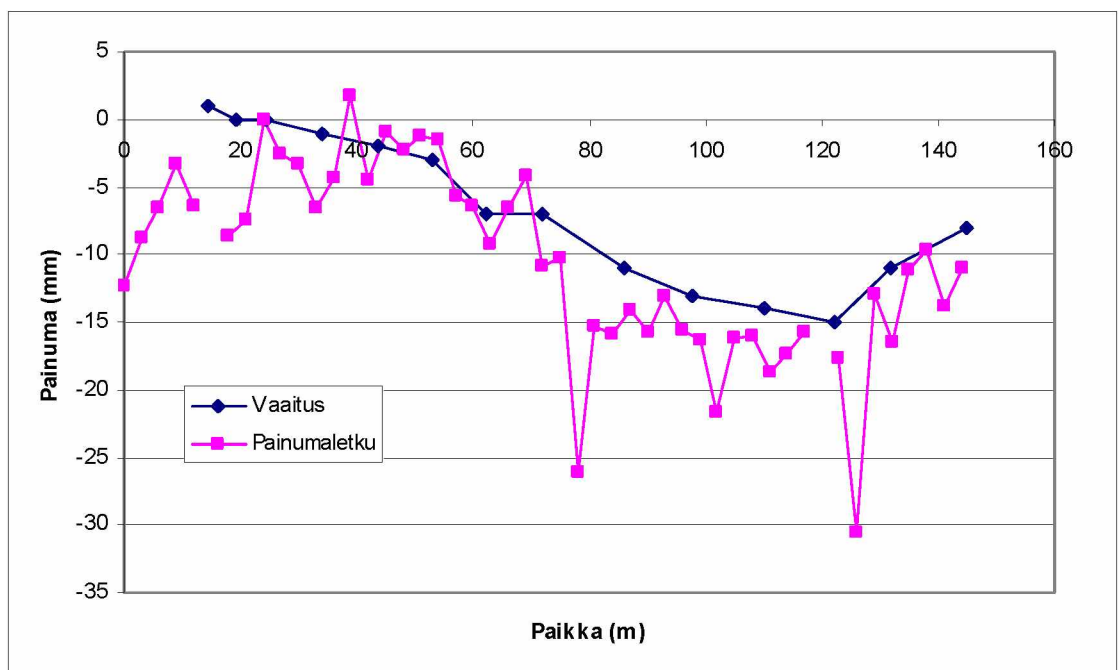
Saarinen, M. 2008. Ratojen alusrakenteissa käytettyjen materiaalien routimisherkkyys. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 7/2008. Ratahallintokeskus, Helsinki. 75 s. 18 liites.

Zeiner, A. 2007. Reporter 56, The Global Magazine of Leica Geosystems. Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland 2007. 24 p

Zeiner, A. 2007. Reporter 57, The Global Magazine of Leica Geosystems. Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland 2007. 24 p.

Painumaletkun pitkäaikaisseuranta Paimiossa

Projektissa demokappaleena asennettu painumaletku jätettiin mittaamaan Paimioon, jotta saataisiin selville myös painumaletkun pitkäaikaiskestävyys ja pitkän ajan mittaustarkkuus. Projektin aikana tehtiin kahdet onnistuneet vaaitukset (7.4.2009 ja 10.6.2009), mutta lyhyenä ajanjaksona painumia ei mittaustarkkuuden rajoissa havaittu vaaitsemalla. Jälkimmäisellä vaaituskäynnillä painumaletkun asemaa muutettiin hieman parista kohdasta. Tämän jälkeen kohteella ei ole tiettävästi tehty mitään toimenpiteitä, mikä olisi muuttanut letkun asemaa penkereen painumia lukuun ottamatta. Vaaitus toistettiin seuraavana kesänä, jotta saataisiin vertailukelpoinen mittaustulos, jossa ei ole esim. routanousuja mukana. Noin vuoden aikana (10.6.2009 – 3.6.2010) mitatut painumat on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Paimion koekohteesta painumaletkulla ja vaaitsemalla mitatut painumat ajanjaksolla 10.6.2009–3.6.2010.

Penkereen painuma sekä painumaletkulla että vaaitsemalla mitattuna näyttäisi noudattelevan samaa linjaa. Penger painuu voimakkaimmin mittausjakson paaluvälillä 100–120 (noin km 175+020). Myös painuman suuruus molemmilla mittaustavoilla mitattuna on varsin yhtenevä. Painumaletkun mittaustulokset on esitetty suhteessa anturiin 10, joka sijaitsee paalulla 24 (painuma = 0 mm). Vaaituksissa on käytetty kiintopisteenä virallista korkeuskiintopistettä, joka sijaitsee aivan kohteen vieressä. Vaaitukset on tehty painumaletkun alle asennetuista painumatarkistimista.

Mittaustulosten samankaltaisuus on hämmästyttävän hyvä, joten painumaletku näyttäisi kokonaisuutta ajatellen toimivan varsin mallikkaasti. Mittaustuloksissa on toki hajontaa, josta osa on todellista korkeusvaihtelua, osa myös mittausvirhettä. Eri menetelmillä tehtyjen mittaustulosten keskinäinen hajonta oli keskimäärin noin 3 millimetriä.

Painumaletkun alkuosan mittaustulos vaeltelee lämpötilavaihteluiden vaikutuksesta useita millimetrejä. Tähän on ainakin osasyynä poikkileikkaukseltaan pieni putki painumaletkun ja tasaustastian välillä. Turhan pieni putki aiheuttaa virtausvastusta ja siten muuttaa alkupään tuloksia. Vastaavasti painumaletkun toinen pää on avoin, josta lämpötilavaihteluista aiheutuva nesteen tilavuuden muutos pääsee tasaantumaan helpommin. Lämpötilamuutokset aiheuttavat paine-eron putken päiden välille, joka ilmenee juuri putken alkupään vaelteluna. Vastaisuudessa on syytä asentaa painumaletku siten, että toinen pää on suljettu ja toisen pään yhteys tasaustastiaan on mahdollisimman avoin. Myös letkun sijoittelu tasasyvyydelle maastossa auttaa pitämään lämpötilan vakiona putken matkalla ja mittaustulokset siten tarkempina.

Painumaletkussa toimivista antureista ainoastaan kaksi poikkeaa selvästi yleisestä linjasta. Nämä anturit joko poikkeavat ominaisuuksiltaan hieman muista tai sitten näissä mittauspisteissä on tapahtunut jokin poikkeava liike. Muutos ei ole kuitenkaan tapahtunut nopeasti ja todennäköisin vaihtoehto lieneekin joko antureiden ryömintä tai asennuksen jälkeinen välikerrosmateriaalin tiivistyminen. Näistä ensimmäinen olisi mittauksen toiminnan kannalta ikävä ominaisuus.

Viidestäkymmenestä asennetusta anturista kolme oli huonosti toimivaa 1,5 vuoden käytön jälkeen. Näiden antureiden mittaustulos ei ole mukana kuvassa 1. Nämäkin anturit toimivat ajoittain, mutta mittaustulos on ajoittain selkeästi virheellinen. Kyseisistä rikkiäisistä antureista kaksi aloitti oireilunsa jo pian asennuksen jälkeen, joten syyksi voidaan epäillä huonoa liitosta tai kytkentää jossain anturipiirin komponentissa. Tällaisen valmistusteknisen seikan voisi olettaa poistuvan sarjavalmistuksessa. Antureista yksi alkoi oireilla vasta runsaan vuoden jälkeen asennuksesta, mikä viittaa vikaan anturissa tai mikroprosessorissa. Antureiden pitkäaikaistoimivuus näyttäisi kuitenkin olevan varsin hyvä, mutta ei täydellinen.

Pulssitetun TOF-valokuitututkan käyttö ratapenkan liikkeiden mittaauksessa

TkT Ari Kilpelä, TkT Veijo Lyöri ja TkL Guoyong Duan
Oulun yliopisto, Elektroniikan Laboratorio

Johdanto

Liikenneväylien pohjarakenteiden mittaus on tarpeen, jotta havaittaisiin ajoissa ennakoimattomat liikkeet. Mittauksella voidaan minimoida korjauskustannuksia ja parantaa turvallisuutta. Maamassojen liikkeiden mittaauksessa voidaan käyttää useita menetelmiä, esim. laserkeilausta, gps-mittausta, ekstensometrejä, inklinometrejä ja elektronisia vesivaakoja /1/. Kolme jälkimmäistä ovat melko yksinkertaisia ja halpoja, mutta ne ovat pistemäisiä ja niitä käytettäessä täytyy koko mitattava matka johdottaa. Inklinometri ja vesivaaka mittaavat pinnan kallistumaa maan vetovoimaa referenssinä käyttäen, joten mittaustuloksesta ei voi suoraan lukea siirtyneen maamassan liikettä. Ekstensometri mittaa suoraan esim. korkeussuuntaista muutosta, mutta se vaatii lähelleen jonkun referenssipisteen, joten se on hankala suurten maamassojen mittaauksessa. Laserkeilaus ja gps-mittaus antavat sitävastoin suoraan tuloksen massan liikkeestä. Ensinmainittu on tarkka menetelmä, mutta vaatii operaattorin eikä sovellu jatkuvaan mittaukseen. GPS-mittaus puolestaan on jatkuvaan mittaukseen soveltuva, pistemäinen, tarkkuuden ollessa senttimetriluokkaa, ja vaatii myös sähköisenä johdotuksen jokaiseen mittauspisteeseen.

Valokuidun käyttö tarjoaa mahdollisuuden toteuttaa suurien kohteiden mittaukset suhteellisen yksinkertaisesti. Anturien pituudet ovat tyypillisesti metreistä kymmeneen metriin ja anturit voidaan monissa menetelmissä ketjuttaa suorituskyvyn huonontumatta. Pitkien valokuituanturien sovelluskohteita ovat mm. sillat, maarakenteet sekä komposiittirakenteet, kuten säiliöt, putket ja siivet. Valokuituantureilla on mitattavan kohteen liike saatava siirrettyä valokuidun pituussuuntaiseksi muutokseksi. Tämä tapahtuu suunnittelemalla asennusgeometria tarkoituksenmukaisesti. Joissakin sovelluksissa, kuten patovuodoissa, voidaan myös käyttää valokuidun lämpötilan mittaus- ominaisuutta hälytysluonteisena menetelmänä.

Viimeisen 20 vuoden aikana toteutettuja pitkien valokuituantureiden tekniikoita ovat olleet mm. Brillounin spektrimittaus (BOTDR) /2/ sekä matalan koherenssin interferenssin /3/ ja mikrolaipuman mittaus /4/. Myös pistemäisillä FBG (Fiber Bragg Grating)-laitteilla /5/ ja TOF (Time-of-Flight)-periaatteilla /6/ on toteutettu pitkiä antureita. Pulssitetulla Raman-tutkalla voidaan toteuttaa pelkkä lämpötilanmittaus hyvinkin pitkillä antureilla kohtuukustannuksin (laitteen hinta 20-30 ke).

BOTDR -periaate mahdollistaa jopa satojen antureiden sijoittamisen samaan kuituun. BOTDR:n tarkkuus ja spatiaalinen resoluutio ovat $\pm 10 \mu\text{Strainia}$ ($1 \mu\text{Strain} = 1 \mu\text{m/m}$) ja 1 m, vastaavasti, ja 10 km kuidun mittausaika on muutamia minutteja. BOTDR-laitteet ovat tyypillisesti kalliita ($> 100 \text{ ke}$).

Valkoisen valon interferometrin resoluutio on tyypillisesti $2 \mu\text{m}$ n. 10 sekunnin mittausajalla ja 0.25 – 20 m anturipituuksilla. Interferometriä voidaan käyttää monikanavaisena optista kytkintä käyttämällä. Myös interferometrit ovat kalliita ($> 50\text{-}80 \text{ ke}$).

Mikrolaipuma-antureilla saavutetaan $1 \mu\text{m}$ resoluutio ja 100 Hz näytteenottotaajuus 10 m mittaisella anturilla. Elektroniikkatoteutus on ainakin periaatteessa yksinkertainen ja edullinen. Myös mikrolaipuma-anturit ovat pohjimmiltaan yksikanavaisia, toisena rajoituksena on hankala toteutus anturien ollessa pitkiä.

FBG-menetelmällä voidaan toteuttaa metrien mittaisia antureita, jos mittauskuitu pääsee venymään tai supistumaan tasaisesti koko pituudeltaan. Tyypillinen resoluutio on $0.2 \mu\text{Strainia}$ ja mittaustaajuus 1000 Hz. Samaa kuituun voidaan kytkeä sarjaan jopa kymmeniä antureita. Tyypillinen FBG-laitteen hinta on 10-20 000 e ja yksi hila maksaa 100 e / kpl.

Näytteenotto-oskilloskooppeihin perustuvia TOF-laitteita sovellettiin valokuitumittauksiin 90-luvun alussa, mutta niiden ongelmana oli huonohko suorituskky ja laitteisto oli kallis.

Tässä projektissa valittiin ratapenkan sortuman mittaukseen elektroniikan laboratoriossa kehitetty TOF-pulssitekniikkaan perustuva valokuidun venymämittausmenetelmä, koska laboratoriolle oli siitä runsaasti aikaisempaa kokemusta (erityisesti vapaan ilmatilan etäisyysmittauksessa) ja sen katsottiin tuovan suorituskykyisen ja hinnaltaan edullisen vaihtoehdon perinteisten rakennemittausten rinnalle.

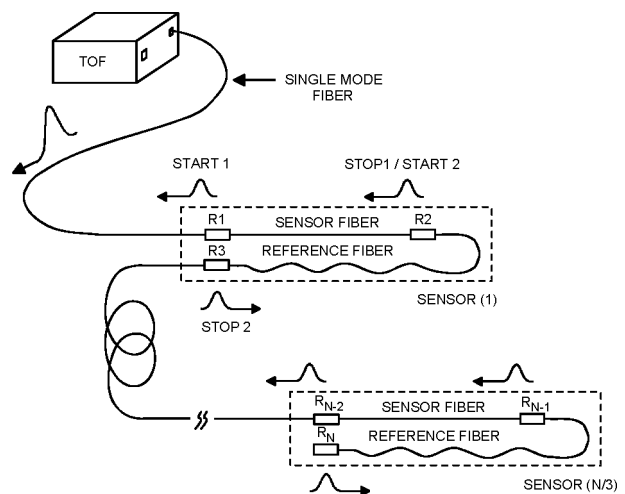
TOF-laitteiston rakenne

TOF-periaatteella toimiva venymämittari (kuva 1) sisältää laserlähettimen, vastaanottimen, ajoitusdiskriminaattorin, aikaväliä mittaavan piirin (Time-to-Digital-Converter = TDC) ja ohjelmoitavan logiikkapiirin (Field-Programmable-Gate-Array = FPGA). Mittaustuloksia luetaan PC-tietokoneella. Mittauksessa yksimuotokuituun lähetetään 1310 nm aallonpituudella lyhyt valopulssi (pituus ~ 2 ns, teho ~100 mW) josta osa (n. 0.1 %) heijastuu takaisin jokaisesta heijastimesta (kuva 2) ja mittalaite mittaa takaisin heijastuneiden pulssien muodostamasta pulssijonosta pulssien väliset ajat, joista voidaan laskea heijastimien etäisyydet toisistaan. Kahden heijastimen välinen kuitu muodostaa mittausturin. Antureita voidaan ketjuttaa useita peräkkäin, ainoa rajoitus on pulssitehon väheneminen pitkällä anturiketjuilla. Ajanmittauspiiri TDC mittaa pulssien väliajat ja FPGA:ta käytetään lukemaan TDC:ltä tulevat mittaustulokset ja laskemaan joukosta yksittäisiä mittaustuloksia keskiarvot. Keskiarvoistuksella saadaan mittausepävarmuutta (precision) parannettua keskiarvoistettujen pulssien lukumäärän neliöjuureen verrannollisena. Mittaustietokone (PC) huolehtii mittaustulosten pitkäaikaisesta varastoinnista.



Kuva 1. TOF-venymämittari

Kuvassa 2 on esitetty mittaajärjestelmä, jossa useita antureita on kytketty peräkkäin. Yksi anturi sisältää kaksi kuitua, varsinaisen anturikuidun sekä referenssikuidun, jotka on kytketty sarjaan ja joiden pituus on yhtä suuri. Heijastimet (R1, R2 and R3) sijaitsevat kuituliittimissä, joiden avulla valokuidut on kytketty toisiinsa. Varsinainen anturikuitu on jännityksessä (normaalisti esivenytetty 0.5% venymään, jos on odotettavissa, että liike voi tapahtua molempiin suuntiin) ja referenssikuitu on löysällä. Referenssikuidun tehtävä on eliminoida lämpötilan muutoksista aiheutuvat yhteismuotoiset virheet. Myös mittauskuituja voidaan käyttää toistensa referenssikuituina (varsinkin, jos suurimmat muutokset tuloksissa aiheutuvat lämpötilan muutoksista) tai referenssikuituja voi olla vähemmän kuin mittauskuituja. Laitteen tarkkuutta voidaan kasvattaa esim. 10-kertaiseksi vyyhdittämällä mittakuitua 10 kertaa mitattavan kohdan yli.



Kuva 2. Mittausperiaate

Jotta laitteella saavutettaisiin tarpeeksi hyvä spatiaalinen resoluutio (eli minimimitta lyhimälle anturin mitalle), pulssin pituuden täytyy olla mahdollisimman lyhyt. Laitteessa on päädytty 2 ns pulssinpituuuteen (puoliarvoleveys), joka mahdollistaa n. 0.3 m pitkän kuidun pituuden mittaamisen.

Tässä esitellyssä TOF-valokuitututkassa hyvä stabiilisuus ja tarkkuus perustuu useaan seikkaan: anturikuitujen käyttämiseen toistensa referensseinä, jatkuvaan amplitudin säätöön, yksikanavaisuuteen, laserpulssituksen epäsynkronisuuteen ajanmittauksen kanssa, suureen pulssitustaajuuteen ja sen mahdollistamaan suureen keskiarvoistusmäärään sekä mittaustulosten ohjelmalliseen suodattukseen. Tärkein näistä parametreista, yksikanavaisuus, eliminoi suuren joukon vahvistinkanavan virheitä, mm. säröstä ja kulkuaikaviiveen muuttumisesta aiheutuneet virheet. Referenssikuitua käyttämällä pystytään eliminoimaan sellaisia virheitä kuten esim. mittakuidun taitekertoimen muuttumisesta aiheutuva mittavirhe lämpötilan muuttuessa. Amplitudien eli mittauspulssien voimakkuuksien säädöllä eliminoidaan, paitsi lämpötilan aiheuttamat muutokset, myös anturiketjun eri heijastimien yksilölliset amplitudierot.

Valokuiduissa käytetyt heijastimet ovat stabiileja, koska ne ovat PC-liittimiä (PC=Physical Contact), joissa on koko ajan liitinten välillä fyysinen kontakti, mikä pitää liitinpintojen välisen matkan vakiona. Liitinpintojen hionnan epähomogeenisuudesta saattaa kuitenkin aiheutua jonkin verran muutoksia pulssien amplitudeihin lämpötilan muuttuessa.

Toinen vaihtoehto valokuituheijastimille on käyttää erikoiskuitua, jossa kuituun on tehty säännöllisin välein (välimatka = anturin mitta) Braggin hiloja valokuidun sisälle. Braggin hilat ovat nykyään standarditekniikkaa, mutta tässä käytetyt hilat poikkeavat tavallisista sikäli, että tässä vaaditaan leveämpää aallonpituusalueutta ja heijastusvoimakkuudeltaan tasalaatuisempia hiloja kuin tavallisesti varsinaisissa Braggin hila-laitteissa, joissa mitataan aallonpituutta eikä pulssien välistä aikaa.

Laserlähettimen ja ajanmittauspiirin oskillaattorien synkronisuuden eliminoimiseksi laitteessa on käytössä laajakaistainen kohinageneraattori, josta saadulla kohinasignaaliilla lisätään laserlähettimen liipaisupulssien vaihe-eroa ajanmittauksen oskilaattoriin. Tämä tapahtuu sen vuoksi, että pulssien keskiarvoistuksesta saataisiin täysi hyöty eli ao. menetelmä pienentää mittausepävarmuutta.

Suuren pulssitustaajuuden merkitys stabiilisuudessa on siinä, että anturi- ja referenssikuiduista saadaan mittaustuloksia vuorotellen nopeassa tahdissa, mikä mahdollistaa useiden yhteismuotoisten, dynaamisten, virheiden eliminoimisen. Ohjelmallisella suodattimella poistetaan mittaustuloksista ne (kohinan

aiheuttamat) mittaustulokset, jotka ovat selvästi liian suuria tai liian pieniä.

Teoria

Valokuidun asennuksessa on oleellista, että valokuidun pituussuunta asennetaan mahdollisimman paljon painuman oletettuun suuntaan. Käytännössä kuitu täytyy asentaa esim. siksak-muotoon eli peräkkäin kytkettyjen V-kirjainten muotoon. Tällöin painuman tullessa jollekin matkalle, jonka pituus on l , päädytään kuvan 3 mukaiseen poikkileikkaukseen. Jos oletetaan, että painuma on muodoltaan pyöreä, voidaan valokuidun yhteenlaskettu venymä Δx (ilmoitettuna millimetreissä) laskea kaavalla:

$$\Delta x = 1000 \cdot \frac{2l}{v} \left[\sqrt{a^2 + \left(h + \frac{s}{\alpha} b^2\right)} - \sqrt{\frac{v^2}{4} + h^2} \right],$$

$$\text{missä } a = \left(\frac{s}{\alpha} \sin \left(\frac{\alpha v}{2l} \right) \right) \text{ ja}$$

$$b = \left[1 - \cos \left(\frac{\alpha v}{2l} \right) \right]$$

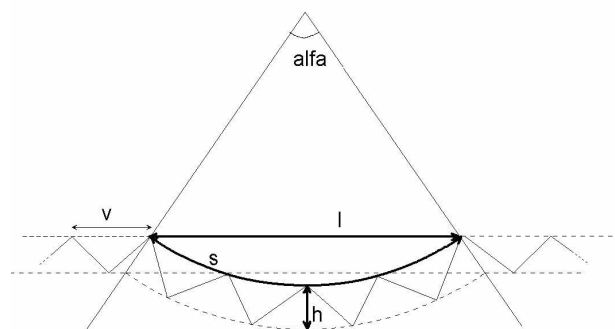
jossa s, α, l, v ja h ovat kuvan 3 mukaiset termit.

Tietäen, että

$$s = l \cdot \frac{0.5\alpha}{\sin(0.5\alpha)}$$

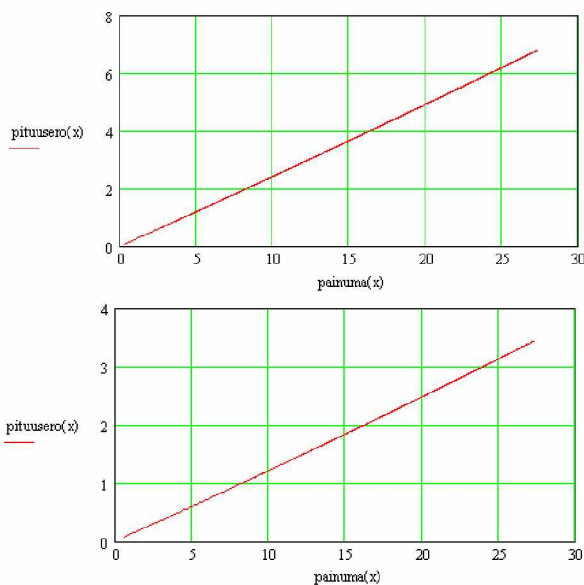
voidaan kaaren pituus s ja edelleen Δx ratkaista hakemalla α lle arvo kaaren pituuden eri arvoilla. Painuma millimetreissä saadaan kaavasta:

$$\text{painuma} = \left(\frac{s}{\alpha} - \sqrt{\left(\frac{s}{\alpha}\right)^2 - \left(\frac{l}{2}\right)^2} \right) \cdot 1000$$



Kuva 3. Painuma siksak-muotoon asennetun valokuidun alueella.

Kuvassa 4 on esitetty painuman yllä esitetyillä kaavoilla laskettu arvo olettaen, että painuman pituus on 5 m (ylempi kuva) ja 10 m (alempi kuva), painuma millimetreissä vaaka-akselilla ja valokuidun yhteenlaskettu venymä millimetreissä painuman matkalta pystyakselilla. Laskuissa siksakin korkeus h oli 0.3 m ja yhden "V":n pituus 5 m. Kuvista nähdään, että painuneen alan pituuden suhde anturin siksakin korkeuteen vaikuttaa herkkyyteen. Mitä korkeampi on siksak-kuvion muoto, sitä herkempi laite on. Laite antaa painuman integraalin eli arvon sille, kuinka paljon maata on siirtynyt. Jos tiedetään, kuinka pitkä painuma on, menetelmä antaa painuman maksimi-arvon tai jos tiedetään maksimi-arvo, menetelmä antaa painuman pituuden.



Kuva 4. Valokuidun yhteenlaskettu venymä millimetreissä, kun painuman pituus on 5 m (ylempi kuva) ja 10 m (alempi kuva).

Laboratoriokoe

Laitteen toimintaa kokeiltiin toukokuussa 2008 TTY:n Rakennustekniikan osaston laboratoriossa. Koetta varten TTY:llä rakennettiin $0.3 \times 0.3 \times 10$ m kokoinen puulaatikko, joka täytettiin hiekalla ja johon mittauskuitu asennettiin V-muotoon V:n pituuden ollessa 10 m eli kärki keskellä, 5 m

kohdalla. Mittauksessa puulaatikko oli sijoitettuna laboratorion lattialle ja sitä painettiin hydraulitunkilla keskeltä, v:n kärjen yläpuolelta, ja samalla mitattiin sekä tunkin varren liikettä että valokuidun venymää (kuva 5).

Valokuituna käytettiin ns. armeijan kenttävalokaapelia, joka on Draka Comteqin valmistamaa kaapelia, jonka halkaisija on n. 5 mm, ulkovaippa polyuretaania (PU) ja sisällä toinen PU-vaippa, jonka sekä sisä- että ulkopuolella sijaitsevat kevlarvahvikkeet. Ko. kaapelin arveltiin soveltuvan tähän siksi, että se on kestävä, mutta kuitenkin riittävän venyvää mittauskäyttöön. Kuvassa 5 on esitetty 2 kpl kenttävalokaapeleita ja molemmissa kaapeleissa on kenttäkäyttöön sopiva jatkoskohdan liitosmuhvi, jonka sisälle voidaan laittaa heijastuspulssin antava kuituliitin. Valokuituliittimet hiottiin Draka Comteq Oulun tehtaalla. Hiontaprosessi poikkeaa hieman tavallisesta UPC (Ultra Physical Contact)-hionnasta.

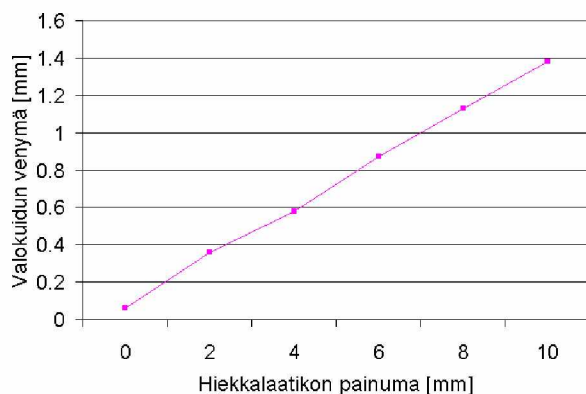


Kuva 5. Valokuidun venymäkoe laboratoriossa.



Kuva 6. Kaksi kenttävalokaapelia, molemmissa liittosuhvit.

Kuvassa 7 on esitetty mitatut tulokset, valokuidun venymä pystyakselilla ja hiekkalaatikon painuma vaaka-akselilla. Mittaustuloksista on poistettu lämpötilan muutosten aiheuttama ryömintä. Kuvasta nähdään, että mitattu venymä oli ko. konfiguraatiolla 10 mm painumalla 1.38 mm, kun laskettu venymä oli vastaavilla parametreilla 1.22 mm (käytännössä sama tulos saatiin myös v:n pituudella 5 m, joka on esitetty kuvassa 4).



Kuva 7. Laboratoriossa mitattu hiekkalaatikkoon sijoitetun V-muotoisen anturin venymä hiekkalaatikon painuman funktiona

Käytännön koe ratapenkassa

Valokuidun venymän mittaamiseen perustuvaa TOF-menetelmää kokeiltiin myös käytännön kokeessa ratapenkassa Paimiossa. Ratapenkaan radan vierelle asennettiin 7 kpl peräkkäisten V-kirjainten muotoon sijoitettuja 20 metrin pituisia antureita peräkkäin ja ketjun molempiin päihin 110 mm muoviputkeen löysästi samanmittaiset referenssianturit. Yhden V-muodon pituus oli n. 5 m ja korkeus n. 0.3 m. Asennusteknisten syiden vuoksi V-muodon pituus ja korkeus eivät olleet täysin tarkkoja. Antureiden välissä käytettiin kuvan 6 mukaisia liittosuhveja. Asennuksessa hiekan/soran siirto V-muotoon suoritettiin pääosin kaivinkoneella. Pituussuunnassa käytettiin mittanauhalla mitattuja merkkejä, jotka osoittivat V-muodon yläkohtien paikat. Asennuksen aikana valokuitu saatiin pysymään paikallaan n. 0.3 m mittaisilla betonilla täytetyillä halkaisijaltaan 110 mm muoviputken pätkillä. Muoviputki oli samaa 110 mm putkea, jonka ulkopinta oli korrugoitu (uritettu) ja sisäpinta sileä, jota käytettiin myös referenssiantureiden suojaputkena. Todennäköisesti valokuidun asennusta olisi saatu nopeutettua kiinnittämällä valokuitu muoviputkista tehtyyn jigiin, joka pakottaa kuidun haluttuun V-muotoon. Kuvassa 8 on esitetty maahan jo asennettua, mutta ei vielä peitettyä, valokuitua sekä etualalla putkikaivo, jota käytettiin referenssikuidun aloituspisteenä. Siihen tuotiin korrugoidulla 110 mm putkella suojattu siirtokuitu ”mökistä”, jossa mittauselektronikka sijaisi, n. 100 m etäisyydellä. Samanaikaisesti valokuidun kanssa asennettiin myös penkan pistemäistä korkeuden mittaamista varten TTY:n kehittämä taipuma-anturi, joka koostui öljytäyteisen muoviputken sisään asennetuista peräkkäisistä paineantureista.

Ratapenkkamittauksessa oli alunperin tarkoitus käyttää taiwanilaisen Bropticsin valmistamia Braggin hiloja, koska Braggin hiloilla heijastimet saadaan kuidun/kaapelin sisälle eikä liittosuhveja tarvita. Lisäksi Braggin hiloja perustuvat heijastimet ovat huomattavan stabiileja lämpötilan funktiona ja tehohäviöt ovat pienemmät kuin liitinheijastimilla. Tähän tarkoitukseen tilattiin Bropticsilta 3 kpl valokuituja, joissa molemmissa oli 9 kpl Braggin hiloja 20 m välein. Kuidut jälkiprosessoitiin Suomessa ensin Oplatek Oy:llä Leppävirralla lisäämällä kuituun akrylaattipäällyste ja varsinainen kaapeli valmistettiin Oulussa Nestor

Cables:n tehtaalla. Kaapelin rakenne on samanlainen kuin laboratoriokokeessa käytetyssä kaapelissa oli. Bropticsin tuotantoviiveiden vuoksi kaapeli oli valmis vasta vuodenvaihteessa 2008/2009, jonka vuoksi sitä ei ehditty käyttää ratapenka-asennuksessa.

Ratapenkasta mitatuissa tuloksissa (1.4. -2.7. 2009) on raakadatassa selvästi nähtävissä valokuitujen herkkyys lämpötilan muutoksille, sekä vuorokausimuutokset että pitempiaikainen maan sulamisesta ja lämpenemisestä aiheutuvat muutokset. Integraalinen lämpötilan noususta aiheutuva muutos oli 0.5-7 mm eri antureilla (luvussa ovat mukana myös päissä olevat referenssianturit) ja vuorokautinen lämpötilasta aiheutuva edestakainen muutos oli suurimmillaan n. 3 mm. Käytännössä osoittautui, että suojaputkiiin sijoitettujen referenssikuitujen riippuvuus ilman lämpötilasta oli paljon suurempaa kuin maahan sijoitettujen varsinaisten mittauskuitujen. Tämä johtui todennäköisesti siitä, että ulkoilma pääsee virtaamaan putkissa suhteellisen vapaasti ja ympäröivän maan lämpötilan vaikutus on vähäisempi. Näin ollen tällaisenaan asennettuja referenssikuituja ei voida käyttää luotettavasti lämpötilan vaikutuksen eliminointiin. Lämpötilan muutosten eliminointiin käytettiin tämän vuoksi tekniikkaa, jossa kaikkien varsinaisten mittauskuitujen tulokset on keskiarvoistettu ja keskiarvotulos on puolestaan vähennetty jokaisen mittauskuidun tuloksesta.

Lopullinen mittaustulos on esitetty kuvassa 9. Kuvassa on esitetty antureiden S2-S7 tulokset. Antureita S1 ja S9 ei ole esitetty sen vuoksi, että ne olivat referenssiantureita, joiden tulokset eivät ole yllämainitusta syystä informatiivisia. Anturi S8 puolestaan jäi osaksi ilmaan, koska anturoitava alue ratapenkassa loppui kesken. Antureiden S2-S7 tuloksissa esiintyy edelleen vuorokautisten lämpötilanmuutosten vaihtelua, mutta se voidaan suodattaa pois esim. liukuvalla keskiarvolla, kuten kuvassa 9 on tehty. Jäljelle jää +/- 1mm integraalinen muutos kaikilla muilla antureilla, paitsi S2 ja S5. Millimetrin sisällä pysyvälle integraaliselle muutokselle voidaan antaa kaksi selitystä, se voi olla johtua valokuitujen heijastimien epähomogeenisuudesta tai toisaalta maaperän paikallisista lämpötilaeroista. Anturin S2 osalta suuri (n. -2.5 mm) integraalinen muutos johtuu todennäköisesti siitä, että anturin toinen pää on kaivossa ja osittain kierretty kaivon keskellä olevan betonoidun muoviputken ympärille ja lukittu

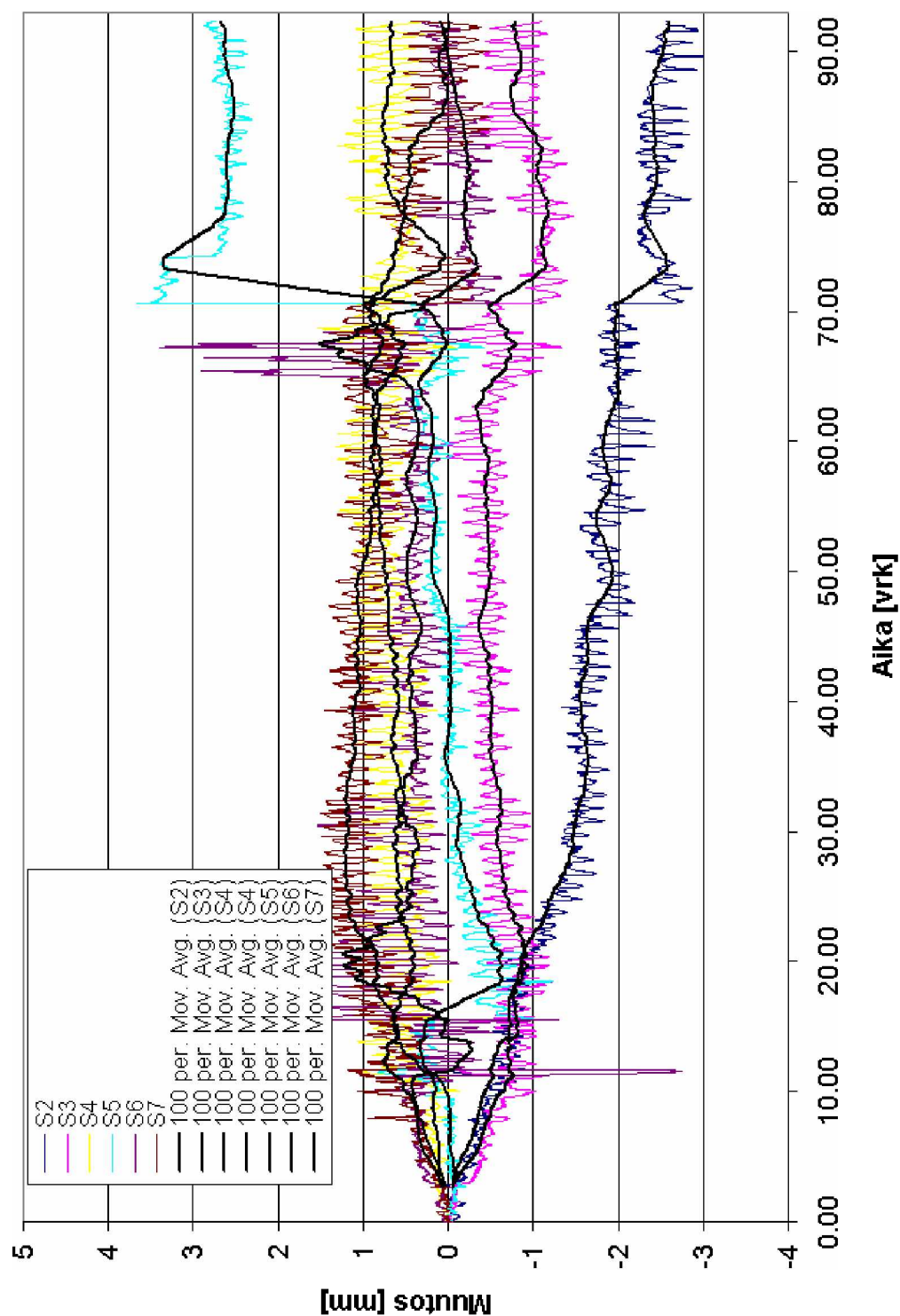
vain teipillä paikoilleen, minkä vuoksi siihen kohdistuu sekä voimakkaammat lämpötilamuutokset että asennusaikaisen jännityksen mahdollinen relaxoituminen. Anturissa 5 näkyy 10.6. 2009 tahallisesti aiheutettu pysyvä 3 mm venymä, joka on osittain relaxoitunut 14.6. 2.4 mm pysyväksi muutokseksi. Arvioimalla painuman pituudeksi 5-10 m, voidaan laskea, että valokuidun venymän muutosta vastaava vertikaalinen painuma oli 12.5 – 24 mm. Tietojemme mukaan ratapenkassa on tapahtunut 10.6. ”yhden korkealla sijaitsevan taitepisteen hallittu pudotus simuloiden penkereen painumaa, jossa taitepistettä laskettiin 18 mm”. Käyttämällä vertikaalipainumalle arvoa 18 mm saadaan painuman pituudeksi 7.5 m. Tässä käytetyn keskiarvo-laskentamenetelmän vuoksi ratapenkan todellinen muutos heijastuu hieman myös muiden antureiden tuloksiin, mikä näkyy käyrissä pieninä hyppyinä.

Kuvassa 9 anturin S6 tuloksissa esiintyy myös lyhytaikaisia muutoksia, jotka johtuvat kuituliittimen hionnan epähomogeenisuudesta ja siitä aiheutuvasta amplitudin heilumisesta. Kaikista antureista kaikkiaan 4:ssä anturissa amplitudit olivat erittäin stabiileja, kahdessa ei niin stabiileja, mutta sähköinen amplitudinsäätö korjasi ne ja kolmessa anturissa (S1, S6 ja S8) esiintyi niin voimakasta huojuntaa, että se häytti mittauksia. Heijastimien epästabiilius on korjattavissa Braggin hila- kuitua käyttämällä.



Kuva 8. Penkkaan asennettua valokuitua ja referenssianturin alkupisteenä käytetty putkikaivo.

Venymä ajan funktiona, kuidut toistensa referensseinä + liukuvat keskiarvot



kuva 9. Anturien S2-S7 venymä ajan funktiona, vähennettynä kaikkien ao. anturien keskiarvosta sekä liukuvat keskiarvot.

Yhteenveto

Tässä projektissa on esitetty TOF-periaatteella toimivalle valokuidun venymämittarille teoreettiset laskelmat ja käytännön kokeet sekä laboratorioissa mitattuna että ratapenkkaan sovellettuna.

Sekä teoria että laboratoriomittaukset osoittivat, että valokuitu täytyy asentaa mahdollisimman paljon oletetun venymän (painuman) suuntaisesti. Yksi mahdollisuus on käyttää ns. V-muotoa, kuten tässä projektissa tehtiin. Menetelmä antaa absoluuttisesti painuman integraalin eli lukeman siitä, kuinka paljon maata on siirtynyt. Toissijaisesti menetelmällä voidaan arvioida painuman pituutta ja korkeutta antamalla toiselle arvolle arvio.

Laboratoriomittaukset tukivat laskettua teoreettista arvoa valokuidun venymästä ja sen perusteella laitteen herkkyys on riittävän hyvä, jotta valokuidun todellinen venymä saadaan erotettua lämpötilaryöminnästä.

Käytännön kokeet ratapenkassa osoittivat, että lämpötilaryöminnän eliminomisessa suojaputkeen sijoitettujen referenssianturien lämpötilariippuvuus oli liian suuri ja selvästi suurempi kuin mittaustantureiden, koska ulkoilma pääsi putken sisälle. Käytännölliseksi ratkaisuksi sen sijaan osoittautui varsinaisten anturikuitujen käyttö toistensa referensseinä. Se toteutettiin laskemalla kaikista mittaustantureiden tuloksista keskiarvot ja vähentämällä jokaisen anturin tulos keskiarvosta. Jäljelle jäi luokkaa ± 1 mm ryömintä koko 20 m anturin mitalle niillä antureilla, jotka oli asennettu koko mitaltaan maahan. Tämä voi aiheutua esim. maan lämpötilaeroista. Todelliseksi maan liikkeen muutokseksi mitattiin anturilla S5 10.6. 3 mm venymä, joka jäi 4 päivän kuluttua 2.4 mm arvoon. Tietäen, että painuma oli tahallaan aiheutettu 18 mm vertikaalinen muutos, voidaan vastaavaksi painuman pituudeksi laskea 7.5 m.

Projektin tulokset olivat lupaavia ottaen huomioon, että kyseessä oli tiettävästi ensimmäinen kerta maailmassa, kun TOF-periaatetta käytettiin maamassojen liikkeiden mittaamiseen. Anturina käytetty armeijan kenttävalokaapeli osoittautui tähän tarkoitukseen soveliaaksi, venyväksi, mutta silti riittävän hyvin suojatuksi. Sitävastoin valokuituheijastimien toteutuksessa on parantamisen varaa ja siihen on olemassa ratkaisu, Braggin hilojen käyttö heijastimina. Myös

anturikaapelin asennusta saataisiin todennäköisesti nopeutettua muoviputkista tehtyä jigirakennetta käyttämällä. Varsinainen mittalaite, TOF-venymämittari, puolestaan toimii koko mittauksen ajan suunnitellulla tavalla.

Kiitokset

Kiitämme yhteistyökumppaneita Tampereen Teknillisen Yliopiston Rakentamistekniikan osaston Maa- ja Pohjarakenteiden yksikköä ja työn tilaajaa Ratahallintokeskusta.

Viitteet

- 1 Instrumentation of embankment dams and levees, American Society of Civil Engineers, ASCE Publications 1999, ISBN 0784403228, 9780784403228, 88 s.
- 2 Bao X, DeMerchant M, Brown A & Bremner T (2001) Tensile and compressive strain measurement in the lab and field with the distributed Brillouin scattering sensor. Journal of Lightwave Technology 19(11): 1698-1704.
- 3 Inaudi D & Vurpillot S (1999) Monitoring of concrete bridges with long-gage fiber optic sensors. Journal of Intelligent Material Systems and Structures 10(4): 280-292.
- 4 Braunstein J, Ruchala J & Hodac B (2002) Smart Structures: Fiber-optic deformation and displacement monitoring. Proc First International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management (IABMAS), Barcelona, Spain, Available on CD (ISBN: 84-95999-05-6)
- 5 Kersey A, Davis M, Patrick H, LeBlanc M, Koo K, Askins C, Putnam M & Friebele E (1997) Fiber grating sensors. Journal of Lightwave Technology 15(8): 1442 - 1463.
- 6 Lyöri V, Kilpelä A, Duan G, Mäntyniemi A & Kostamovaara J (2007) Pulsed time of-flight radar for fiber-optic strain sensing. Review of Scientific Instruments 78(2): 024705.

Liik
enne
vira
sto

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-255-543-4

www.liikennevirasto.fi